

黄土高原水土流失型非点源污染过程模拟研究进展

吴磊^{1,2}, 马孝义¹

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要:黄土高原严重的水土流失造成了土壤氮磷流失, 不仅降低了化肥的利用率, 而且对水环境造成了潜在威胁。从黄土高原区水土与养分流失的典型性入手, 剖析和总结了黄土高原区基本概况、水文过程、土壤侵蚀、水土流失型非点源污染过程模拟及防控策略等的研究进展。针对目前黄土高原区尤其是黄土丘陵沟壑区非点源污染研究较少, 提出了未来黄土高原地区非点源污染的研究方向与建议: 黄土区非点源污染物流失机理, 非点源污染负荷估算方法, 流域水、沙、污染物耦合模型以及3S技术与流域非点源污染防控决策耦合应用等。

关键词:黄土高原; 水土流失; 土壤氮磷流失; 流失型非点源污染; 负荷估算

中图分类号: X506

文献标志码: A

文章编号: 2095-2783(2015)13-1497-10

Research progress in erosion-type nonpoint source pollution process simulation of the Loess Plateau

Wu Lei^{1,2}, Ma Xiaoyi¹

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Water and Soil Erosion Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Loss of nitrogen and phosphorus in soil and water loss area of the Loess Plateau not only reduces the utilization rate of fertilizer, but also is a potential threat to aquatic environments. This study takes the typicality of soil and nutrient loss in the Loess Plateau Region as a starting point to deeply analyse and systematically summarize the basic status of the Loess Plateau, the research progress of hydrological process, soil erosion, erosion-type nonpoint source pollution and its control strategies of the Loess Plateau. Aiming at the few existing studies on the Loess Plateau, the key research directions of nonpoint source pollution in the Loess Plateau for the future were proposed, such as the loss mechanism of nonpoint source pollution, the load estimation method of nonpoint source pollution in the Loess Plateau, the coupled model of water, sediment and pollution in the Loess Plateau, the combined application of 3S technology and control strategies of erosion-type nonpoint source pollution in the Loess Plateau etc. This result may provide reference for studying the modeling process of erosion-type nonpoint source pollution in the Loess Plateau.

Key words: Loess Plateau; water and soil loss; loss of nitrogen and phosphorus in soil; erosion-type nonpoint source pollution; load estimation

水利部第二次遥感普查结果表明, 目前全国水土流失面积达 367 万 km², 已占国土总面积的 1/3 以上, 其中以黄河流域水土流失状况最为严重, 目前已达 45 万 km², 占黄河流域总面积的 60%^[1-2]。黄土高原是我国乃至全世界水土流失最严重的地区之一^[3], 其年泥沙输出量占黄河总泥沙量的 90%^[4], 且黄土高原多数是高含沙水流, 即“水土一起流”现象表现得十分典型^[5]。严重的水土流失造成了土壤氮磷流失^[6], 1988 年起, 中国科学院水土保持研究所对黄土高原水土流失区采用径流小区精确研究土壤氮磷流失, 研究结果表明, 土壤氮磷流失以泥沙为主, 径流中含量甚微^[7]。可见, 黄土高原水沙过程的特殊性导致水沙氮磷流失机理各不相同, 与我国其他地区相比差别更大, 水土流失特别是泥沙流失是黄

土区流域土壤氮磷流失的重要原因^[8-9]。黄土高原的水土和养分流失主要由为数不多的几场暴雨引起^[10-11], 伴随着这些阵性降雨事件流失的养分量对年污染负荷总量起决定性作用^[12]。黄土高原降水年际变化大, 丰水年降水量为枯水年的 3~4 倍; 年内分布不均, 汛期(6—9 月)降水量占年降水量的 70% 左右, 且以暴雨形式为主^[13-14]; 同样, 黄河流域的非点源污染在时间上也呈现出一定的季节性, 污染负荷主要集中在 7—9 月, 与流域降雨季节基本一致, 表明降雨径流是非点源污染物迁移输出的主要驱动力之一, 水土流失是污染物运移的重要途径^[15]。我国黄土高原除部分平原区以外, 大部分地区土壤氮磷素匮乏^[16], 大量使用化肥成为粮食增产的重要手段^[17], 但化肥的过量使用, 不仅对提高产量和节约资

收稿日期: 2015-03-22

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20130204120034); 国家自然科学基金资助项目(51309194)

作者简介: 吴磊(1981—), 男, 副教授, 主要研究方向为流域水文过程、土壤侵蚀与非点源污染模拟与防控, conquer2006@126.com

源不利,而且可能导致由水土流失引起的水环境问题^[18-20]。因此,为探索黄土高原区尤其是土壤侵蚀剧烈、水土流失严重的黄土丘陵沟壑区水土流失型非点源污染过程,本文分析了黄土高原区地理、水文、气象、径流、土地利用等基本概况,综述了目前该区水土流失型非点源污染过程模拟研究进展及发展趋势,以期开展黄土高原区水土流失型非点源污染时空分布模拟及制定防控策略提供科学参考。

1 黄土高原区概况

黄土高原位于北纬 32°~41°,东经 107°~114°之间,按县域行政区划线计算,包括山西省、内蒙古自治区、河南省、陕西省、甘肃省、宁夏回族自治区、青海省共 7 个省(自治区)341 个县(市)(图 1)。黄土高原地区总的地势是西北高,东南低(图 1)。该区属大

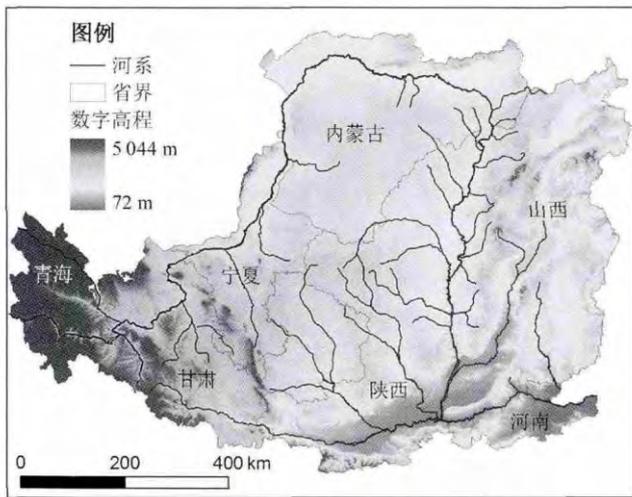


图 1 黄土高原省级行政区划、水系、数字高程

陆性季风气候,位于我国东西部之间半湿润区向半干旱区过渡地带,年均气温 6~14℃,年降水量 200~700 mm。降水分布很不平衡:年际变化很大,丰水年和干旱年降水量相差 3~4 倍;年内分布很不均匀,且以暴雨形式为主;降水量总的趋势是由东南向西北、由山地向平地递减。该区黄土覆盖平均厚度为 50~100 m,是世界上黄土分布最集中、覆盖厚度最大的区域。全区植被稀疏,覆盖率低,天然次生林和天然草地面积很少^[21]。

黄土高原地区总人口 1.08 亿,其中农业人口 7 333 万人,占总人口 70% 以上;土地总面积 64.87 万 km²,占全国土地总面积的 6.76%^[22]。黄土高原大部分地区水蚀剧烈,区内共有水土流失面积 45 万 km²,占该区总面积的 69.4%,年均输入黄河的泥沙达 16 亿 t^[23],是我国乃至全世界土壤侵蚀形势最为严峻的区域。根据中国 1997—2000 年 1:10 万土壤侵蚀强度等级图^[24],对黄土高原土壤侵蚀强度等级面积及比例分布进行统计分析(表 1);水力侵蚀在黄土高原 7 省区占有重要比重,以山西省、陕西省、甘肃省最多,内蒙古自治区和宁夏回族自治区次之。在流失的每吨土壤中,平均含全氮 1.2 kg、全磷 1.5 kg,土壤肥力大幅下降^[25]。总之,黄土高原农业生产规模大,人口集中,地形地貌以山地丘陵为主,水土流失严重,非点源污染分布较为广泛,农业生产非点源污染主要分布在渭河、汾河和宁蒙灌区。水土流失主要来自黄河流域中游黄土丘陵沟壑区。该区是重要的泥沙输出源,夹杂在泥沙中的氮磷营养盐是造成水体污染的重要因素^[26],这是黄土高原区土壤侵蚀与非点源污染的一个显著特点,也是未来黄土高原地区水土保持科学的重点研究领域之一^[27-28]。

表 1 黄土高原 7 省区土壤侵蚀类型及其强度等级面积分布

侵蚀类型及强度等级	平均侵蚀模数/ (t·km ⁻² ·a ⁻¹)	面积/万 km ²							合计/ 万 km ²	百分比/%
		内蒙古自治区	山西省	陕西省	宁夏回族自治区	青海省	甘肃省	河南省		
水力微度侵蚀	<1 000	2.649 6	6.225 7	3.748 9	0.634 4	1.665 9	1.800 4	0.914 3	17.639 3	28.42
水力轻度侵蚀	1 000~2 500	0.995 0	3.029 9	2.457 1	0.712 0	0.969 1	1.794 0	0.652 2	10.609 3	17.1
水力中度侵蚀	2 500~5 000	0.923 8	3.764 7	1.714 1	0.608 0	0.560 7	3.037 2	0.203 1	10.811 6	17.42
水力强度侵蚀	5 000~8 000	0.457 4	0.916 5	1.106 7	0.633 6	0.044 9	2.773 6	0.014 4	5.947 2	9.58
水力极强度侵蚀	8 000~15 000	0.373 0	0.790 4	1.255 4	0.209 4	0.008 8	1.440 9	0	4.078 0	6.57
水力剧烈侵蚀	>15 000	0.083 9	0.901 2	1.244 9	0.000 2	0.001 3	0.000 1	0	2.231 7	3.6
风力微度侵蚀	<200	0.927 5	0	0.293 2	0.809 7	0	0.015 0	0	2.045 5	3.3
风力轻度侵蚀	200~2 500	1.312 5	0	0.026 6	0.573 8	0	0.009 1	0	1.923 2	3.1
风力中度侵蚀	2 500~5 000	1.540 2	0	0.155 9	0.664 0	0	0.033 2	0	2.394 4	3.86
风力强度侵蚀	5 000~8 000	0.823 8	0	0.525 1	0.224 5	0	0.001 1	0	1.574 6	2.54
风力极强度侵蚀	8 000~15 000	1.045 2	0	0.011 6	0.041 1	0	0	0	1.099 5	1.77
风力剧烈侵蚀	>15 000	1.152 5	0	0.348 9	0.053 4	0	0.000 4	0	1.555 1	2.51
冻融微度侵蚀		0	0	0	0	0.055 0	0.004 8	0	0.059 8	0.096
冻融轻度侵蚀		0	0	0	0	0.006 5	0.007 6	0	0.014 2	0.023
冻融中度侵蚀		0	0	0	0	0.031 2	0	0	0.031 2	0.05
重力侵蚀		0	0	0	0	0	0.000 2	0	0.000 2	0.000 3
工程侵蚀		0.010 1	0.024 8	0	0	0.001 6	0.002 8	0.002 6	0.042 0	0.068

2 黄土高原水土流失型非点源污染过程模拟研究进展

黄土高原是典型的水土流失区,严重的土壤流失造成氮磷养分流失。黄土高原区水土流失型非点源污染过程模拟研究的关键在于对其输移载体——径流引起的流失泥沙进行量化研究,而土壤流失量的准确估算离不开特定地区特定水文过程的模拟。因此,本文从降雨-径流、土壤侵蚀、水土流失型非点源污染 3 个方面综述水土流失型非点源污染过程模拟研究进展。

2.1 降雨-径流模拟

雨滴击溅和降雨产生的径流能够分离和搬运土粒,是土壤水蚀的动力因素。超渗产流是黄土高原流域产流的主导机制,代表了流域产流的基本特征^[29],蓄满产流在黄土高原流域只作为一种可能的产流形式存在^[30-31]。因此,模拟黄土高原区流域水文循环过程,一个重要的基础是地表超渗产流计算。国外主流的分布式水文和水蚀预报模型多考虑了超渗产流过程,其中 ANSWERS 模型和 WEPP 模型分别采用了 Green-Ampt 方程及其改进形式^[32]计算地表入渗过程;SHE 模型和 InHM 采用 Richards 方程数值求解地表积水的入渗^[33-34]。然而,描述降雨入渗的 Green-Ampt 方程和描述土壤水分运动的 Richards 方程是针对均质下垫面的“点”方程,需要把流域划分为不同的计算单元分别进行求解,对于黄土高原,需要划分更多的网格单元才能表示此区域内地形起伏大、沟壑密度高的特点,计算量大。

国内对黄土高原水文模型的研究始于赵人俊提出以 Horton 和 Philip 下渗公式为基础的陕北模型^[29]。近年来,杨涛等^[35]提出的模型基于栅格单元,采用 Philip 公式计算超渗产流,并在黄河多沙、粗沙区的典型小流域试用;刘卓颖等^[36-37]基于较高分辨率的栅格单元,以 Richards 方程计算地表入渗,给出了一个适合于中小尺度流域连续演算的分布式水文模型。然而,这些模型难以对分布式产流物理机理进行系统性描述。Yang 等^[38]提出的基于地貌特征的 GBHM 模型克服了 TOPMODEL 模型对水文要素空间变异性考虑不足和 MIKESHE 模型计算量大的问题,但目前应用于黄土丘陵水土流失区案例较少。

2.2 土壤侵蚀与水土流失型非点源污染模拟

黄土高原降水稀少,生态环境十分脆弱,水土流失导致坡面土壤中养分大量流失,造成中下游水体污染加剧^[39]。程红光等^[40]根据大流域尺度非点源污染负荷预测方法^[41],对 2000 年黄河流域不同类型非点源污染进行了评估验证,结果表明,2000 年黄河流域总氮、总磷非点源污染负荷已超过点源污染。针对水污染状况复杂的黄河流域,我国学者在非点

源污染方面作了大量的研究工作,其中以李强坤等^[42]的研究成果最具系统性及代表性。他们构建了黄河流域非点源污染研究初步框架,并将黄河流域非点源污染的主要类型划分为农业非点源污染、水土流失区非点源污染、城市非点源污染和库区非点源污染。其中,位于中游水土流失区的非点源污染主要是在土壤侵蚀运移基础上产生的,其研究的关键在于对其输移载体——径流引起的流失泥沙进行量化。模型是土壤侵蚀与非点源氮磷污染负荷研究的必要手段^[43],20 世纪 50 年代、60 年代,以美国农业局为首的研究机构开发了一些有关水土流失和面源污染的经验统计模型,包括径流曲线数(SCS)和通用土壤流失方程(USLE)。USLE^[44]是土壤侵蚀模拟研究过程中具有代表性的模型之一。随后,在美国,诸如 USLE 的改进形式 RUSLE^[45]、GLEAMS、EPIC、AGNPS 和美国水蚀预报模型 WEPP 得到相继开发;在欧洲,荷兰林堡土壤侵蚀模型 LISEM 和 SHE 模型的泥沙模块 SHESED、欧洲土壤侵蚀模型 EUROSEM、ANSWERS 模型的土壤侵蚀模块等也相继问世。在这些模型中,USLE、RUSLE 是目前国外吸附态非点源污染模拟研究中广泛使用的方法。许多功能比较强大的非点源污染综合模型^[46],如 SWAT、AGNPS、LASCAM、EPIC 及 SWMM 模型等,均以 RUSLE 方程作为土壤侵蚀子模型,但许多研究表明,RUSLE 模型在运用时,需根据研究流域条件和研究目的进行适当修正^[47]。20 世纪 70 年代初,出现了直接模拟非点源污染发生、发展及影响的数学模型,如 USDA-ARS 研发的 CREAMS 模型奠定了非点源污染模型发展的里程碑。该模型首次综合了农业非点源污染迁移过程的各个环节,即水文、侵蚀和污染^[48]。20 世纪 80 年代以来,学者们开始将 RS、GIS 与一些经验统计模型进行集成,以 CREAMS 模型为蓝本,相继研发了一系列国际上较成熟的农业非点源污染模型,如 GLEAMS、EPIC、AGNPS、AnnAGNPS、ANSWERS、SWAT、HSPF 等模型均是由 CREAMS 模型演化而来,且这些模型在世界各地都得到了不同程度的应用^[49]。目前,国内使用较多的土壤侵蚀与非点源模型主要包括 RUSLE、GeoWEPP、SWAT、AnnAGNPS 和 HSPF 等(表 2)。

水土流失型非点源污染是在土壤侵蚀运移基础上产生的,它是侵蚀过程为基础,耦合水体污染过程^[53]而产生。水土流失型非点源污染的实质是土壤流失^[54],因此,水土流失型非点源污染的研究是以土壤侵蚀的准确定量为基础。我国早期的土壤侵蚀建模研究,特别是对黄土高原地区,多采用径流量、洪峰流量、流域平均坡度、土壤可蚀性等因素建立经验统计模型,这类模型不考虑土壤侵蚀和泥沙输移的具体过程,对地域的针对性很强^[55]。径流曲线数学模型(SCS-CN)、USLE 及其改进形式在我国也得到了广泛地应用,其中,Liu 等^[56-57]利用黄土丘陵沟壑

表 2 国内常用的非点源污染模型^[50-52]

名称	时间	模型简介	研发部门
HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran)	1981	以小时为时间步长,可对流域尺度进行长时间连续模拟。起源于 1966 年的 Stanford 水文模型,目前已发展成为比较成熟的 BASINS4.0 系统;能长时间模拟水文系列,也能对面源和点源污染进行模拟;侵蚀模型考虑雨滴溅蚀、径流冲刷侵蚀和沉积作用;污染物包括氮、磷和农药等,考虑复杂的污染物平衡。	美国环境保护署(USEPA)
AnnAGNPS (Annualized Agricultural Nonpoint Source)	1986	以天为时间步长,可对流域尺度进行长时间连续模拟。在模型的连续性和模拟尺度上均比 AGNPS 模型有明显提升,是用于模拟评估流域地表径流(SCS 水文模型)、泥沙侵蚀(RUSLE)和氮磷营养盐流失的连续型分布式参数模型。此外,还可用于计算点源和畜牧养殖场产生的污染物,计算水坝、水库和集水坑等拦蓄设施对径流和泥沙的影响等。	美国农业部农业研究局(USDA-ARS)联合明尼苏达州污染控制局和国家自然资源保护局(NRCS)共同开发
SWAT (Soil and Water Assessment Tool)	1990	以天为时间步长,可对流域尺度进行连续分布式模拟。模型经历了 9 个版本的改进,目前已由 SWAT1990 升级到 SWAT2012,主要包括水文、气象、侵蚀、营养物质和农药迁移模块。用于模拟和评价长期土地管理等人类活动对于具有多种土壤类型、土地利用和管理条件的大面积复杂流域的径流、泥沙负荷和农业污染物质迁移的长期影响和作用。	美国农业部农业研究局(USDA-ARS)
RUSLE(Revised Universal Soil Loss Equation)	1993	RUSLE 是经验模型,基本结构同 USLE(1965 年),在内部算法的细化和预测精度上均比 USLE 有所提高,并且方程中各因子的测算方法也有改进。可模拟多种管理措施下的水土流失状况,以及地貌景观的空间演变特性,考虑了土壤侵蚀过程,增加了场次降雨土壤侵蚀预报功能。	美国农业部(USDA)
GeoWEPP (the geospatial interface for Water Erosion Prediction Project)	2003	以天为时间步长,是 WEPP 模型与 GIS 结合的改进形式。模型与 GIS 有机结合,可直接利用数字化数据对土壤侵蚀量进行估算,同时,能够直接利用各种数字化地学数据生成模型输入参数,评价流域水土保持规划的可行性。适合于研究环境系统变化对水文及侵蚀过程的影响,包括气候变化、水文过程及产沙之间的相互作用。	美国农业部(USDA)

区径流小区试验资料,在 USLE 基础上提出了适合我国国情的北京土壤流失方程(CSLE),并经我国相关学者^[58-59]将其成功应用于陕西及北京山区小流域土壤侵蚀定量评价,进而证实了该模型的实用性。另外,WEPP 等基于机理的模型在我国也有探索与应用,但由于模型参数确定的问题,在中国应用的范围较小^[60]。鉴于经验模型无法预测侵蚀发生的详细过程,基于过程的模型因物理机理较强而使其难以在黄土高原直接应用。国内学者提出了一些适合黄土高原特点的具有物理机理的土壤侵蚀模型。如蔡强国等^[61]建立了一个有一定物理基础的能表示侵蚀—输移—产沙过程的小流域次降雨侵蚀产沙模型,虽然这个模型考虑了流域侵蚀产沙中的不同子过程,但其计算是基于降雨场次,难以进行多时段连续性模拟研究。综上,考虑到黄土高原丘陵沟壑区土质疏松,土壤剥离与泥沙运动过程复杂,其水土流失具有侵蚀量大且时空分布差异明显、侵蚀产沙过程及量化研究难度大、侵蚀发生种类多等特点^[62],需要把水文过程、土壤侵蚀过程与非点源污染过程耦合起来对水土流失型非点源污染过程进行模拟研究。模型化也是我国非点源污染研究的主要方向之一,但目前多为引用国外模型并修正^[63-64]。SCS 模型因结构简单、USLE/RUSLE 因较好地解决了特定条件下的长期平均土壤流失的定量估算问题而被广

泛应用于吸附态非点源污染模型中^[65-67]。例如,杨胜天等^[68]利用 USLE 对全国因水土流失引发的吸附态氮磷流失量进行了估算;杨胜天等^[69]还进行了全国非点源污染分区分级,分析了黄河区非点源污染的产污特征;郝芳华等^[41]提出了大尺度区域非点源污染负荷估算方法。SWAT 模型及 AGNPS 等大型分布式模型也被引入国内,并在黄土区非点源污染的研究中得到了应用,比如李怀恩等^[70-71]应用改进输出系数模型与 SWAT 模型对黑河流域、灞河流域、沔河流域、渭河流域等进行了非点源污染负荷估算、非点源污染控制措施效果情景模拟、流域污染控制规划,以及非点源污染控制技术方面的研究。SWAT 模型在湿润、半湿润的水沙和营养物质模拟中效果较好,经过改进的 SWAT 模型在西北旱区黑河流域^[72-73]、黄河流域^[74]、黄河兰州以上^[75]、新疆军塘湖河流域^[76]等地区的水量与融雪径流模拟中都取得了较好的结果。然而 SWAT 模型在黄土高原区的非点源污染模拟情况较少涉及,在水资源模拟与管理中应用较少^[77]。针对监测资料匮乏、现有模型应用困难等实际问题,李家科^[78]分别基于支持向量机、多变量灰色神经网络及自记忆原理理念,并以黄河一级支流渭河流域为对象,建立了非点源污染负荷模拟模型,为有限资料条件下模拟非点源污染负荷提供了新理念、新方法。近年来,国内对景观格

局与生态过程的关系问题开展了一系列研究,并将其理论应用在黄土高原地区,索安宁等^[79]针对黄土高原丘陵沟壑区水土流失这一典型的非点源污染问题,应用景观空间负荷对比指数和景观坡度指数空间识别方法,对黄土高原泾河流域 12 个子流域进行了实证研究。陈利顶等^[80-82]用“源”、“汇”景观格局指数开展了黄土高原等地区的非点源污染评价。

3 黄土高原水土流失型非点源污染研究展望与建议

为了调控、改善黄土高原严重的水土及养分流失现状,基于土壤侵蚀的水土流失型非点源污染研究必将成为该区水环境领域研究的重要方向。由于黄土高原水土流失型非点源污染研究区域广泛,因此需要开展水文、泥沙与非点源污染过程的联合模拟,通过选取典型研究区并结合该区域污染特征,采取点面结合、模型集成的方法进行非点源污染负荷估算及防控策略研究,具体可以归纳为 4 个方面。

1)黄土高原多流域尺度水、沙、污染物耦合模型研究。

目前,与土壤流失密切相关的水土流失型非点源污染的研究中,大多数是把水文模拟、土壤侵蚀模拟和非点源污染模拟分开进行,或者是水文模型与土壤侵蚀模型结合,或者是土壤侵蚀模型与非点源污染模型结合,或者是国外开发的有局地特点的综合模型,而关于把降雨径流、土壤侵蚀与非点源污染物运移相耦合的研究报道较少^[83],更没有与黄土区流域水沙过程的特殊性和氮磷流失的典型性相结合。因此,针对黄土区流域水沙过程与氮磷流失的特殊性,构建适合黄土高原小流域的降雨、产流、侵蚀、溶质径流迁移物理基础模型,揭示水土流失型非点源氮磷运移机理,定量估算非点源污染负荷时空分布特征,合理制定黄土区流域尺度非点源污染防控决策已成为我国黄土高原水土流失型非点源污染迫切需要解决的主要关键问题。

2)黄土高原水土流失型非点源污染负荷估算方法研究。

非点源污染随区域气候、水文、土地利用、土壤、地形地貌等的不同而具有空间异质性和时间不均匀性^[84],排放的分散性导致其边界和关键源区不易识别,降水与其他影响因子的复交互作用决定了非点源发生具有较强的随机性和不确定性,非点源监测困难造成长时间序列的非点源污染监测资料缺失^[85]。因此,探索有限资料条件下适合黄土高原水土流失型非点源污染负荷的估算方法,在今后一段时期将是我国黄土高原区非点源污染研究的重要方向之一。

3)现在信息技术与流域非点源污染防控决策耦合应用研究。

集成化模型是解决流域非点源污染的发展方

向,以航空摄影、陆地卫星数据库、陆地资源信息系统和 GIS 为代表的 3S 技术与非点源污染模型结合广泛应用于流域水文过程、土壤侵蚀产沙过程机理及量化研究、分布式非点源污染评价与预测、不同最佳管理措施(best management practices, BMPs)组合对非点源污染负荷的影响评价^[86]。基于 GIS 和模型的流域设定情景模拟分析不仅可以更好地探讨流域水土流失及非点源污染的影响特征、影响因素及各因素的影响程度,同时可以为流域水土流失及农业非点源污染控制规划提供科学的决策支持^[87]。因此,将非点源污染模型与 3S 等先进技术手段结合,预测非点源污染程度,并对 BMPs 在控制农业非点源污染中的应用效果和价值型进行模拟与评价研究,同时,开发非点源污染模型信息平台,为非点源污染研究和防治提供有利工具,将是黄土高原乃至全国非点源污染模型应用研究的重要发展方向之一。

4)黄土高原水土流失型非点源污染防控措施。

非点源污染防控总体上可划分为源头减量、过程控制及末端治理 3 个阶段。源头减量指防止污染物扩散至水体、大气、土壤中,包括种植业及养殖业源头控制与治理技术,农业耕作措施(保护性耕作与农田覆盖技术等),农田最佳养分及综合防治的病虫害管理,农田废弃物收集处理等^[88];过程控制指改变或切断污染物迁移转化途径,属于工程措施^[89-90],包括水体岸边缓冲带(河溪沟谷沿岸的林或灌木林带),坡耕地沿等高线种植缓冲草地,乔-灌-草多种组合形式的植物篱,建导流渠(管)、引水渠、沉沙池、滤网等配套设施,以便在雨季将坡地径流引入蓄水设施,不仅能拦截营养物的流失,还可在旱季借助重力作用灌溉农田;末端治理指倡导农业循环经济产业发展,通过种植业、养殖业与农副产品加工的有机结合,促进农业生态系统物质良性循环,发展循环经济的农业。综上所述,黄土高原区水土流失型非点源污染控制措施可总结为等高种植技术、坡改梯、淤地坝、退耕还林(草)、季节性塘、基于拦沙减污效应的植被过滤带、河岸缓冲带建设、导流及蓄水设施、发展绿色农业等。

4 结 语

非点源污染研究始于 20 世纪 60 年代,至今经历了从野外监测、简单经验模型到复杂机理模型的多个发展阶段,取得了丰硕的研究成果,形成了一个较为完善的研究体系。目前我国非点源污染研究虽已涉及不同尺度和不同来源类型,但针对黄土高原尤其是黄土丘陵沟壑区水土流失型非点源污染的研究较少,尚处于初级阶段。据此,对黄土高原区水土流失型非点源污染过程模拟进行了研究进展综述,以期借助本文提供的信息,促进黄土高原区水文模拟、土壤侵蚀和非点源污染过程研究的交叉渗透,开展

黄土高原水土流失区不同类型非点源污染负荷定量研究,健全水资源环境保护体系,进一步丰富非点源污染模拟体系,为我国黄土高原区水土流失型非点源污染的模拟与防控研究提供参考。

致谢:感谢地球系统科学数据共享平台(黄土高原科学数据共享平台)提供相关原始图件。

[参考文献] (References)

- [1] 中华人民共和国水利部. 全国水土流失公告[J]. 中国水土保持, 2002, 23(2): 48.
The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. National soil erosion announcement [J]. Soil And Water Conservation In China, 2002, 23(2): 48. (in Chinese)
- [2] 彭珂珊. 中国水土流失问题的初探[J]. 北京联合大学学报: 自然科学版, 2004, 18(1): 20-26.
Peng Keshan. Primary discussion on problems of soil erosion in China [J]. Journal of Beijing Union University: Natural Science Edition, 2004, 18(1): 20-26. (in Chinese)
- [3] Chen L D, Wang J P, Wei W, et al. Effects of landscape restoration on soil water storage and water use in the Loess Plateau Region [J]. China Forest Ecology and Management, 2010, 259(7): 1291-1298.
- [4] 任美镔. 黄河的输沙量: 过去、现在和将来: 距今 15 万年以来的黄河泥沙收支表[J]. 地球科学进展, 2006, 21(6): 552-553.
Ren Meie. Sediment discharge of the Yellow River, China: past, present and future; a synthesis [J]. Advances in Earth Sciences, 2006, 21(6): 552-553. (in Chinese)
- [5] 许炯心. 黄土高原高含沙水流形成的自然地理因素[J]. 地理学报, 1999, 54(4): 318-326.
Xu Jiongxin. Physico-geographical factors for the formation of hyperconcentrated flows in the Loess Plateau of China [J]. Acta Geographica Sinica, 1999, 54(4): 318-326. (in Chinese)
- [6] 王全九, 王辉, 郭太龙. 黄土坡面土壤溶质随地表径流迁移特征与数学模型[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
Wang Quanjiu, Wang Hui, Guo Tailong. Soil Solute Transfer Characteristics with Surface Runoff and Mathematical Model of Loess Slope [M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)
- [7] 李锐, 李壁成, 杨文治, 等. 中国黄土高原研究与展望[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
Li Rui, Li Bicheng, Yang Wenzhi, et al. Research and Prospect of the Loess Plateau in China [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)
- [8] Lyu X Z, Yu X X, Fan D X, et al. Estimation of non-point source pollution loads caused by soil erosion in China [J]. Journal of Food Agriculture & Environment, 2012, 10(2): 1045-1050.
- [9] 王而力, 王嗣淇, 王雅迪. 风沙土不同粒径微团聚体对氮氮的富集特征[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(2): 320-326.
Wang Erli, Wang Siqi, Wang Yadi. Enrichment characteristic of ammonia-nitrogen on different grain sizes micro-aggregate of sandy soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(2): 320-326. (in Chinese)
- [10] 焦菊英, 王万中, 郝小品. 黄土高原不同类型暴雨的降水侵蚀特征[J]. 干旱区资源与环境, 1999, 13(1): 34-42.
Jiao Juying, Wang Wanzhong, Hao Xiaopin. Precipitation and erosion characteristics of different types of rainfall in the Loess Plateau [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1999, 13(1): 34-42. (in Chinese)
- [11] 张曙光, 张学奎, 王金玲. 关于黄河非点源污染控制问题的思考[J]. 中国水土保持, 2004(8): 11-12.
Zhang Shuguang, Zhang Xuekui, Wang Jinling. Reflections on non point source pollution control problem in the Yellow River [J]. Soil and Water Conservation in China, 2004(8): 11-12. (in Chinese)
- [12] Austin A T, Yahdjian L, Stark J M, et al. Water pulses and biogeochemical cycles in arid and semiarid ecosystems [J]. Oecologia, 2004, 141: 221-235.
- [13] 刘秉正, 李光录, 吴发启, 等. 黄土高原南部土壤养分流失规律[J]. 水土保持学报, 1995, 9(2): 77-86.
Liu Bingzheng, Li Guanglu, Wu Faqi, et al. Regulation of soil nutrients loss in Southern Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 9(2): 77-86. (in Chinese)
- [14] 李志, 郑粉莉, 刘文兆. 1961—2007 年黄土高原极端降水事件的时空变化分析[J]. 自然资源学报, 2010, 25(2): 291-299.
Li Zhi, Zheng Fenli, Liu Wenzhao. Analyzing the spatial-temporal changes of extreme precipitation events in the Loess Plateau from 1961 to 2007 [J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(2): 291-299. (in Chinese)
- [15] 韩凤朋, 郑继勇, 张兴昌. 黄河 6 条支流流域非点源污染分布现状[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(8): 75-81.
Han Fengpeng, Zheng Jiyong, Zhang Xingchang. The distribution of nonpoint source pollution in Yellow River catchment [J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry: Natural Science Edition, 2006, 34(8): 75-81. (in Chinese)
- [16] 贾恒义, 彭琳, 彭祥林, 等. 黄土高原地区土壤养分资源分区及其评价[J]. 水土保持学报, 1994, 8(3): 22-28.
Jia Hengyi, Peng Lin, Peng Xianglin, et al. Partition and evaluation of soil nutrient resources in the Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1994, 8(3): 22-28. (in Chinese)
- [17] 沈善敏. 中国土壤肥力[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
Shen Shanmin. Soil Fertility in China [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1998. (in Chinese)

- [18] Giles J. Nitrogen study fertilizes fears of pollution [J]. *Nature*, 2005, 433(2): 791.
- [19] Hart M R, Quin B F, Long Nguyen M. Phosphorus runoff from agricultural land and direct fertilizer effects: a review [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33: 1954-1972.
- [20] Sun B, Zhang L X, Yang L Z, et al. Agricultural non-point source pollution in China: causes and mitigation measures [J]. *AMBIO*, 2012, 41: 370-379.
- [21] 国家发改委、水利部、农业部、国家林业局. 黄土高原地区综合治理规划大纲(2010—2030年)[R]. 北京: 国家发改委、水利部、农业部、国家林业局, 2010. National Development and Reform Commission, Ministry of Water Resources, Ministry of Agriculture, State Forestry Bureau. Comprehensive management plan of the Loess Plateau (2010—2030) [R]. National Development and Reform Commission, Ministry of Water Resources, Ministry of Agriculture, State Forestry Bureau, 2010. (in Chinese)
- [22] Zheng F L. Effect of vegetation changes on soil erosion on the Loess Plateau [J]. *Soil Science Society of China*, 2006, 16(4): 420-427.
- [23] Rudi H, Victor J. Suitability of transport equations in modeling soil erosion for a small Loess Plateau catchment [J]. *Engineering Geology*, 2007, 91(1): 56-71.
- [24] 李天宏. 中国 1:10 万土壤侵蚀强度等级图(1997—2000年)[EB/OL]. 咸阳: 国家地球系统科学数据共享平台—黄土高原科学数据中心, [2014]. <http://loess.data.ac.cn/data/datadetails.html?dataguid=243299271611403&docId=36>.
Li Tianhong. Graphs of grades of soil erosion in 1/100,000 scale in China (1997—2000) [EB/OL]. Xianyang, Data Sharing Infrastructure of Earth System Science_Data Sharing Infrastructure of Loess Plateau, [2014]. <http://loess.data.ac.cn/data/datadetails.html?dataguid=243299271611403&docId=36>. (in Chinese)
- [25] Wei W, Chen L D, Fu B J, et al. Water erosion response to rainfall and land use in different drought-level years in a loess hilly area of China [J]. *Catena*, 2010, 81(1): 24-31.
- [26] Bardgett E D, Anderson J M, Behan P V, et al. The influence of soil biodiversity on hydrological pathways and the transfer of materials between terrestrial and aquatic ecosystem [J]. *Ecosystems*, 2001, 4: 421-429.
- [27] 郝芳华, 程红光, 杨胜天. 非点源污染模型: 理论方法与应用[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006. Hao Fanghua, Cheng Hongguang, Yang Shengtian. Nonpoint Source Pollution Model_theoretical Method and Application [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006. (in Chinese)
- [28] 刘国彬, 王国梁, 上官周平, 等. 黄土高原地区水土保持科学研究的重点领域[J]. *中国水土保持*, 2008(12): 37-39. Liu Guobin, Wang Guoliang, Shangguan Zhouping, et al. Key fields of scientific study on soil and water conservation of Loess Plateau region [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2008(12): 37-39. (in Chinese)
- [29] 赵人俊. 流域水文模型: 新安江模型和陕北模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984. Zhao Renjun. The Watershed Hydrological Model: Xin'an River Model and the Shanbei Model [M]. Beijing: China Water Power Press, 1984. (in Chinese)
- [30] 汤立群, 陈国祥. 流域尺度与治理对产流模式的分析研究[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1996, 2(3): 22-28. Tang Liqun, Chen Guoxiang. Analysis of river basin scale and management on the runoff yield model [J]. *Journal of Soil Erosion and Water and Soil Conservation*, 1996, 2(3): 22-28. (in Chinese)
- [31] 张升堂, 拜存有, 万三强. 黄土高原水土保持强化降雨入渗分析及灰色预测[J]. *水土保持通报*, 2004, 24(2): 29-33. Zhang Shengtang, Bai Cunyou, Wan Sanqiang. Strengthening rainfall infiltration analysis and grey prediction of soil and water conservation in Loess Plateau [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2004, 24(2): 29-33. (in Chinese)
- [32] Chu S T. Infiltration during an unsteady rain [J]. *Water Resources Research*, 1978, 14(3): 461-466.
- [33] Abbott M B, Bathurst J C, Cunge J A, et al. An introduction to the European hydrological system: systeme hydrologique europeen, "SHE", 2: structure of a physically-based, distributed modeling system [J]. *Journal of Hydrology*, 1986, 87: 61-67.
- [34] Loague K, Heppner C S, Abrams R H, et al. Further testing of the integrated hydrology model (InHM): event-based simulations for a small rangeland catchment located near Chickasha, Oklahoma [J]. *Hydrological Processes*, 2005, 19(7): 1373-1398.
- [35] 杨涛, 张鹰, 陈界仁, 等. 基于数字平台的黄河多沙粗沙区分布式水文模型研究——以黄河岔巴沟流域为例[J]. *水利学报*, 2005, 36(4): 456-460. Yang Tao, Zhang Ying, Chen Jieren, et al. Study on distributed hydrologic model in Chabagou basin of Yellow River based on digital platform [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(4): 456-460. (in Chinese)
- [36] 刘卓颖, 倪广恒, 雷志栋, 等. 黄土高原地区中小尺度分布式水文模型[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2006, 46(9): 1546-1550. Liu Zhuoying, Ni Guangheng, Lei Zhidong, et al. Distributed hydrological model of small and moderate size watersheds in the Loess Plateau [J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2006, 46(9): 1546-1550. (in Chinese)
- [37] 刘卓颖. 黄土高原地区分布式水文模型的研究与应用[D]. 北京: 清华大学, 2005. Liu Zhuoying. Study and Application of a Distributed Hydrological Model on the Loess Plateau [D]. Beijing: Tsinghua University, 2005. (in Chinese)
- [38] Yang D W. Distributed Hydrological Model Using Hill-

- slope Discretization Based on Catchment Area Function Development and Applications [D]. Japan: University of Tokyo, 1998.
- [39] 季莉. 黄河流域典型区域非点源污染研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- Ji Li. Research on Nonpoint Source Pollution in Typical Region of Yellow River Basin [D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese)
- [40] 程红光, 岳勇, 杨胜天, 等. 黄河流域非点源污染负荷估算与分析[J]. 环境科学学报, 2006, 26(3): 384-391.
- Cheng Hongguang, Yue Yong, Yang Shengtian, et al. An estimation and evaluation of non-point source (NPS) pollution in the Yellow River Basin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26 (3): 384-391. (in Chinese)
- [41] 郝芳华, 杨胜天, 程红光, 等. 大尺度区域非点源污染负荷计算方法[J]. 环境科学学报, 2006, 26(3): 375-383.
- Hao Fanghua, Yang Shengtian, Cheng Hongguang, et al. A method for estimation of non-point source pollution load in the large-scale basins of China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26 (3): 375-383. (in Chinese)
- [42] 李强坤, 李怀恩. 黄河流域非点源污染研究初步框架[J]. 人民黄河, 2010, 32(12): 131-135.
- Li Qiangkun, Li Huaen. The preliminary frame of non point source pollution study in the Yellow River watershed [J]. Yellow River, 2010, 32(12): 131-135. (in Chinese)
- [43] 王慧亮, 孙志琢, 李叙勇, 等. 非点源污染负荷模型比较与选择[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(5): 176-182.
- Wang Huiliang, Sun Zhizhuo, Li Xuyong, et al. Comparison and selection among nonpoint pollution models [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 36 (5): 176-182. (in Chinese)
- [44] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses—a guide to conservation planning [R]. Washington D C: Agriculture Research Service, US Department of Agriculture, Agriculture Handbook, No. 537, 1978.
- [45] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE) [R]. Washington, DC: Agriculture Research Service, US Department of Agriculture, Agriculture Handbook, No. 703, 1997.
- [46] Merritt W S, Letcher R A, Jakeman A J. A review of erosion and sediment transport models [J]. Environmental Modelling & Software, 2003, 18: 761-799.
- [47] Kinnell P I A. Event soil loss, runoff and the universal soil loss equation family of models; a review [J]. Journal of Hydrology, 2010, 385: 384-397.
- [48] 莫明浩, 方少文, 涂安国, 等. 水土流失面源污染及其防控研究综述[J]. 中国水土保持, 2012(6): 32-34.
- Mo Minghao, Fang Shaowen, Tu Anguo, et al. Review on non-point source pollution of soil and water loss type and its control research [J]. Soil and Water Conservation in China, 2012(6): 32-34. (in Chinese)
- [49] Borah D K, Bera M. Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models; review of mathematical bases [J]. Transactions of the ASAE, 2003, 46 (6): 1553-1566.
- [50] 夏军, 翟晓燕, 张永勇. 水环境非点源污染模型研究进展[J]. 地理科学进展, 2012, 31(7): 941-952.
- Xia Jun, Zhai Xiaoyan, Zhang Yongyong. Progress in the research of water environmental nonpoint source pollution models [J]. Progress in Geography, 2012, 31 (7): 941-952. (in Chinese)
- [51] 姚瑞华, 王东, 赵越, 等. 非点源污染负荷模型的研究进展[J]. 水文, 2012, 32(2): 11-15.
- Yao Ruihua, Wang Dong, Zhao Yue, et al. Research progress of non-point source pollution models in water environment [J]. Journal of China Hydrology, 2012, 32(2): 11-15. (in Chinese)
- [52] 樊娟, 刘春光, 石静, 等. 非点源污染研究进展及趋势分析[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1306-1311.
- Fan Juan, Liu Chunguang, Shi Jing, et al. Advances and tendencies of the study on non-point source pollution [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(4): 1306-1311. (in Chinese)
- [53] 石辉. 水土流失型非点源污染[J]. 水土保持通报, 1997, 17(7): 99-101.
- Shi Hui. Non point source pollution of soil and water loss type [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1997, 17(7): 99-101. (in Chinese)
- [54] Shen Z Y, Liao Q, Hong Q, et al. An overview of research on agricultural non-point source pollution modeling in China [J]. Separation and Purification Technology, 2012, 84: 104-111.
- [55] 唐政洪, 蔡强国. 我国主要土壤侵蚀产沙模型研究评述[J]. 山地学报, 2002, 20(4): 466-475.
- Tang Zhenghong, Cai Qiangguo. Review on the studies of Chinese main soil erosion and sediment yield models [J]. Journal of Mountain Science, 2002, 20(4): 466-475. (in Chinese)
- [56] Liu B Y, Zhang K L, Xie Y. An empirical soil loss equation [C] // Proceedings of 12th International Soil Conservation Organization Conference, Volume 2. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 21-25.
- [57] 刘宝元. 西北黄土高原区土壤侵蚀预报模型开发项目研究成果报告[R]. 北京: 水利部水土保持监测中心, 2006.
- Liu Baoyuan. The research result report of development projects on soil erosion forecasting model in Northwest Loess Plateau [R]. Beijing: Water and Soil Conservation Monitoring Center of Water Resources Department, 2006. (in Chinese)
- [58] 程琳, 杨勤科, 谢红霞, 等. 基于 GIS 和 CSLE 的陕西省土壤侵蚀定量评价方法研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 61-66.
- Cheng Lin, Yang Qinke, Xie Hongxia, et al. Quantita-

- tive assessment of soil erosion in Shaanxi based on GIS and CSLE [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(5): 61-66. (in Chinese)
- [59] 符素华, 张卫国, 刘宝元, 等. 北京山区小流域土壤侵蚀模型[J]. *水土保持研究*, 2001, 8(4): 114-120.
Fu Suhua, Zhang Weiguo, Liu Baoyuan, et al. Beijing mountain area soil erosion model [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2001, 8(4): 114-120. (in Chinese)
- [60] 王光谦, 李铁键. 流域泥沙动力学模型[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
Wang Guangqian, Li Tiejian. *Basin Sediment Dynamics Model* [M]. Beijing: China Water Power Press, 2009. (in Chinese)
- [61] 蔡强国, 陆兆熊. 黄土丘陵沟壑区典型小流域侵蚀产沙过程模型[J]. *地理学报*, 1996, 61(2): 108-117.
Cai Qiangguo, Lu Zhaoxiong. The process model of erosion and sediment yield in typical small watershed of Loess Hilly Gully Region [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 61(2): 108-117. (in Chinese)
- [62] 姚文艺, 肖培青. 黄土高原土壤侵蚀规律研究方向与途径[J]. *水利水电科技进展*, 2012, 32(2): 73-78.
Yao Wenyi, Xiao Peiqing. Research direction of the study of soil erosion in the Loess Plateau [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2012, 32(2): 73-78. (in Chinese)
- [63] Xia J, Xue J F. A distributed soil erosion and sediment transport sub-model in non-point source pollution and its application in Guishui Watershed [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2010, 1(3): 231-237.
- [64] 向霄, 钟玲盈, 王鲁梅. 非点源污染模型研究进展[J]. *上海交通大学学报: 农业科学版*, 2013, 31(2): 53-60.
Xiang Xiao, Zhong Lingying, Wang Lumei. Review of non-point source pollution models [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science*, 2013, 31(2): 53-60. (in Chinese)
- [65] 余进祥, 郑博福, 刘娅菲, 等. 鄱阳湖流域泥沙流失及吸附态氮磷输出负荷评估[J]. *生态学报*, 2011, 31(14): 3980-3989.
Yu Jinxiang, Zheng Bofu, Liu Yafei, et al. Evaluation of soil loss and transportation load of adsorption N and P in Poyang Lake Watershed [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(14): 3980-3989. (in Chinese)
- [66] 曹高明, 杜强, 宫辉力, 等. 非点源污染研究综述[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2011, 9(1): 35-40.
Cao Gaoming, Du Qiang, Gong Huili, et al. A review of nonpoint source pollution study [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research* [J]. 2011, 9(1): 35-40. (in Chinese)
- [67] 郭圣浩, 孙丽菲. 基于水文模型的面源污染模拟研究综述[J]. *科技传播*, 2010(4): 12-13.
Guo Shenghao, Sun Lifei. Study review of diffuse pollution simulation based on hydrological model [J]. *Science and Technology Communication*, 2010(4): 12-13. (in Chinese)
- [68] 杨胜天, 程红光, 步青松, 等. 全国土壤侵蚀量估算及其在吸附态氮磷流失量匡算中的应用[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(3): 366-374.
Yang Shengtian, Cheng Hongguang, Bu Qingsong, et al. Estimation of soil erosion and its application in assessment of the absorbed nitrogen and phosphorus load in China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(3): 366-374. (in Chinese)
- [69] 杨胜天, 程红光, 郝芳华, 等. 全国非点源污染分区分级[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(3): 398-403.
Yang Shengtian, Cheng Hongguang, Hao Fanghua, et al. Study on partitioned and graded system of non-point source pollution in China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(3): 398-403. (in Chinese)
- [70] 李怀恩, 李家科. 流域非点源污染负荷量化方法研究与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
Li Huaen, Li Jiako. *Study and Application of Quantitative Methods for the Load Quantification of the Non-point Source Pollution in the Basin* [M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese)
- [71] 蔡明, 李怀恩, 庄咏涛, 等. 改进的输出系数法在流域非点源污染负荷估算中的应用[J]. *水利学报*, 2004(7): 40-45.
Cai Ming, Li Huaen, Zhuang Yongtao, et al. Application of modified export coefficient method in polluting load estimation of non-point source pollution [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004(7): 40-45. (in Chinese)
- [72] 黄清华, 张万昌. SWAT 分布式水文模型在黑河干流山区流域的改进及应用[J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2004, 28(2): 22-26.
Huang Qinghua, Zhang Wanchang. Improvement and application of GIS-based distributed SWAT hydrological modeling on high altitude, cold, semi-arid catchment of Heihe River Basin, China [J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2004, 28(2): 22-26. (in Chinese)
- [73] 王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究[J]. *地理科学进展*, 2003, 22(1): 79-86.
Wang Zhonggen, Liu Changming, Huang Youbo. The theory of SWAT model and its application in Heihe Basin [J]. *Progress in Geography*, 2003, 22(1): 79-86. (in Chinese)
- [74] 刘昌明, 李道峰, 田英. 基于 DEM 的分布式水文模型在大尺度流域应用研究[J]. *地理科学进展*, 2003, 22(5): 437-445.
Liu Changming, Li Daofeng, Tian Ying. An application study of DEM based distributed hydrological model on macroscale watershed [J]. *Progress in Geography*, 2003, 22(5): 437-445. (in Chinese)
- [75] Zhao F F, Xu Z X, Huang J X. Impact of climate change on the stream flow in headwater of the Yellow River basin. In: *Proceedings of the International Symposium on Flood Forecasting and Water Resources Assessment for IAHS-PUB* [C] // Beijing: China Water Power Press, 2006: 471-481.
- [76] 孟现勇, 吉晓楠, 刘志辉, 等. SWAT 模型融雪模块的

- 改进与应用研究[J]. 自然资源学报, 2014, 29(3): 528-539.
- Meng Xianyong, Ji Xiaonan, Liu Zhihui, et al. Research on improvement and application of snowmelt module in SWAT [J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(3): 528-539. (in Chinese)
- [77] 程磊, 徐宗学, 罗睿, 等. SWAT 在干旱半干旱地区的应用: 以窟野河流域为例[J]. 地理研究, 2009, 28(1): 65-73.
- Cheng Lei, Xu Zongxue, Luo Rui, et al. Application of SWAT in arid and semi-arid region: a case study in the Kuye River Basin [J]. Geographical Research, 2009, 28(1): 65-73. (in Chinese)
- [78] 李家科. 流域非点源污染负荷量化研究: 以渭河流域为例[D]. 西安: 西安理工大学, 2008.
- Li Jiake. Research on Nonpoint Source Pollution Load Quantification for Watershed—taking the Weihe River Basin as an Example [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [79] 索安宁, 王天明, 王辉, 等. 基于格局_过程理论的非点源污染实证研究: 以黄土丘陵沟壑区水土流失为例[J]. 环境科学, 2006, 27(12): 2415-2420.
- Suo Anning, Wang Tianming, Wang Hui, et al. Empirical study on non-point sources pollution based on landscape pattern & ecological processes theory: a case of soil water loss on the Loess Plateau in China [J]. Environmental Science, 2006, 27(12): 2415-2420. (in Chinese)
- [80] 陈利顶, 傅伯杰, 赵文武. “源”“汇”景观理论及其生态学意义[J]. 生态学报, 2006, 26(5): 1444-1449.
- Chen Liding, Fu Bojie, Zhao Wenwu. Source-sink landscape theory and its ecological significance [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(5): 1444-1449. (in Chinese)
- [81] 陈利顶, 傅伯杰, 徐建英, 等. 基于“源-汇”生态过程的景观格局识别方法—景观空间负荷对比指数[J]. 生态学报, 2003, 23(11): 2406-2413.
- Chen Liding, Fu Bojie, Xu Jianying, et al. Location-weighted landscape contrast index: a scale independent approach for landscape pattern evaluation based on “Source-Sink” ecological processes [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(11): 2406-2413. (in Chinese)
- [82] 孙然好, 陈利顶, 王伟, 等. 基于“源”“汇”景观格局指数的海河流域总氮流失评价[J]. 环境科学, 2012, 33(6): 1784-1788.
- Sun Ranhao, Chen Liding, Wang Wei, et al. Correlating landscape pattern with total nitrogen concentration using a location-weighted sink-source landscape index in the Haihe River basin, China [J]. Environmental Science, 2012, 33(6): 1784-1788. (in Chinese)
- [83] 张玉斌, 郑粉莉, 武敏. 土壤侵蚀引起的农业非点源污染研究进展[J]. 水科学进展, 2007, 18(1): 123-132.
- Zhang Yubin, Zheng Fenli, Wu Min. Research progress in agricultural non-point source pollution caused by soil erosion [J]. Advances in Water Science, 2007, 18(1): 123-132. (in Chinese)
- [84] Ongley E D, Zhang X, Yu T. Current status of agricultural and rural nonpoint source pollution assessment in China[J]. Environmental Pollution, 2010, 158(5): 1159-1168.
- [85] 吴磊. 三峡库区典型区域氮、磷和农药非点源污染物随水文过程的迁移转化及其归趋研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- Wu Lei. Fate and Transport of Non-point Source Nitrogen, Phosphorus and Pesticide Pollution in Typical Area of the Three Gorges Reservoir Area [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012. (in Chinese)
- [86] 林青慧. 基于 AnnAGNPS 模型的潮白河非点源污染模拟研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2007.
- Lin Qinghui. Simulation Study on Non-point Source Pollution in Chaobai Watershed Based on AnnAGNPS Model [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2007. (in Chinese)
- [87] 王晓燕. 非点源污染过程机理与控制管理: 以北京密云水库流域为例[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- Wang Xiaoyan. Mechanism and Control of Non-point Source Pollution Process: Taking the Miyun Reservoir Basin of Beijing as an Example [M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)
- [88] 王昭艳, 李亚光, 李湛, 等. 水土流失防治措施在非点源污染控制中的作用[J]. 水土保持学报, 2003, 17(6): 92-94, 109.
- Wang Zhaoyan, Li Yaguang, Li Zhan, et al. Function of harness of soil and water loss on control of non-point pollution [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(6): 92-94, 109. (in Chinese)
- [89] 杨爱民. 水土保持措施防治非点源污染的作用机制[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(6): 98-101.
- Yang Aimin. Affecting mechanism of soil and water conservation measures controlling nonpoint source pollution [J]. Chinese Soil and Water Conservation Science, 2007, 5(6): 98-101. (in Chinese)
- [90] 胡宏祥, 马友华. 水土流失及其对农业非点源污染的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(6): 408-412.
- Hu Hongxiang, Ma Youhua. Soil and water loss and agricultural non-point source pollution [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(6): 408-412. (in Chinese).