

黄土坡面退水及其氮污染试验研究

张亚丽^{1,2}, 李怀恩¹, 张兴昌^{2,3}, 肖波²

(1. 西安理工大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 中国科学院水利部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; 3. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100)

摘要:坡面退水及其污染物负荷是研究坡地水文过程和污染物迁移机理的重要组成部分。通过室内模拟降雨试验,分析了黄土坡面退水情况及降雨因素、地形地貌和农业管理措施对退水的影响,同时从降雨-径流-土壤相互作用角度探讨了退水矿质氮的浓度和负荷量。结果表明:①黄土坡面退水以地表径流为主,退水时间、退水量和退水强度远小于降雨期地表产流;②降雨强度、地表覆盖(牧草和秸秆覆盖)和地形地貌(坡度和坡长)对坡面退水影响较大,降雨期和退水期的产流强度均与雨强呈对数增加趋势;③降雨停止后,坡面径流的流速减小,与土壤相互作用时间较长,致使退水矿质氮浓度普遍高于降雨结束时径流矿质氮浓度,坡长越长越明显;④坡面退水矿质氮流失以 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 为主, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 流失量较低。

关键词:模拟降雨;黄土坡地;退水;矿质氮负荷;影响因素

中图分类号: X522

文献标识码: A

文章编号: 1006-7930(2007)01-0066-07

当流域上没有降水,流域出口处的流量完全由流域中蓄水量的消退而供给,这时的产流被称为退水^[1]。退水过程含有丰富的与流域有关的信息,包括流域的蓄水特征和含水层特征,是研究流域水量平衡和流域水文响应的重要内容之一^[2]。地表径流与地下径流的退水速度有很大不同:地表径流主要是雨后迅速汇入河道的水流,流速较大,退水快;地下径流主要来源于土层中的渗流,流速较小,退水慢^[1]。国外关于退水的研究主要包括退水特征、影响因素、过程模拟和退水曲线分析的应用研究等方面。如 Anderson^[3]、Boughton^[4]、Wittenbergh^[5]和 Chapman^[6]对退水过程进行了模拟;Zecharias等^[7]指出基流退水决定于平均坡度、河网密度、水力传导率以及排水孔隙度等参数;Smakhtin^[8]指出退水分析已经广泛应用于水文研究、水资源评价规划与管理,以及面向灌溉、供水和地下水资源估算等的短期预报。国内有关径流消退过程的研究主要集中在流域尺度内河川径流和基流方面,关于坡地小单元退水规律的研究只是针对华北典型山区坡地^[2,9],在其他地方的研究很少有报道。在干旱和半干旱地区,当流域内地下水埋深较大,土壤包气带较厚时,退水主要是地表径流退水^[1]。由于此类退水消退速度很快且流量较小,在坡地水文过程和水分循环研究中极易被忽视,此外关于坡面退水污染物负荷的研究也尚未见报道。本文通过黄土坡地模拟降雨试验,研究降雨结束后地表退水情况及其影响机制、退水矿质氮浓度和负荷量,以期为深化坡地土壤水分养分迁移动力学和农业非点源污染机理研究提供理论依据。

1 研究方法

1.1 供试材料

模拟降雨试验在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室模拟降雨大厅进行,采用侧喷式自动模拟降雨系统,喷头高度16 m,雨滴降落终速可达到自然雨滴降落速度的98%以上,降雨特性接近于天然降雨。装土槽为1个长×宽×高=3.8 m×0.3 m×0.6 m和5个长×宽×高=1.0 m×0.5 m×1.2 m的坡度可调式钢槽。槽底均匀打孔,用于模拟天然透水坡面。钢槽下端设集流装置,可定时采集

*收稿日期: 2006-09-20 修改稿日期: 2006-12-05

基金项目: 国家科技部“西部开发”重大项目(2004BA901A13); 国家自然科学基金项目(90610030); 国家科技攻关计划(2006); 西安理工大学优秀博士论文基金(106210623)

作者简介: 张亚丽(1976),女,河南南阳人,博士研究生,主要从事农业非点源污染机理和水土环境保护研究。

径流样. 所用土壤均为黄绵土, 采自黄土高原水土流失最为严重的地区之一——陕西省安塞县, 质地为粉质壤土. 土壤主要理化性质见表 1, 土壤 1 和 2 为重复处理.

表 1 供试土壤主要理化性状

Tab. 1 Basic physical and chemical properties of the soil studied

Soil	Soil mechanical properties / %			Organic matter / %	pH	Nitrate / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Ammonium / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Total nitrogen / %
	> 0.05 mm	0.05-0.01 mm	< 0.01 mm					
①	48.7	22.9	28.4	0.518	8.47	0.61	0.45	0.025
②	52.7	20.9	26.4	0.499	8.43	0.66	0.41	0.023

1.2 试验设计

供试土壤过 5 mm 筛, 装土时控制含水量为 $10 \pm 1\%$, 土壤容重维持在 $1.25 \pm 0.05 \text{ g/cm}^3$, 每 5 cm 一层填装. 在填装上层土壤之前, 抓毛下层土壤表面, 减少土壤分层现象. 试验共包括降雨强度、施肥、秸秆覆盖、牧草覆盖和坡度五个处理, 共有 21 场降雨试验(表 2), 降雨时间均为 90 min. 试验前对降雨强度进行率定, 当降雨强度和降雨均匀度均达到试验要求时方开始降雨试验. 牧草覆盖和坡度处理用长 \times 宽 \times 高 = $1.0 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$ 土槽, 采用降雨前喷施肥料的方法; 其余处理都用长 \times 宽 \times 高 = $3.8 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$ 土槽, 装土时在表层拌施 NH_4NO_3 . 具体喷肥方式为降雨前 1 h, 将一定量 NH_4NO_3 溶解于 200 mL 清水中, 用喷壶均匀喷于土面; 在 $3.8 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$ 土槽装土拌肥时, 最上面一层土层少装 10 kg 土, 分别将一定量 NH_4NO_3 溶于 1 L 清水中, 用喷壶均匀喷在 9 kg 干土上, 充分拌匀后铺在上面(保证土壤含水量和容重满足试验要求), 夯实并保持土面平整. 秸秆覆盖处理中按照上述方法装土(施肥)后, 在土面均匀铺上一定量长约 5 cm 的洁净秸秆, 喷少许水, 使其均匀沉降. 牧草覆盖试验包括草地覆盖和裸地对照处理. 在 $1.0 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$ 的土槽中条播黄土高原常见的多年生黑麦草, 行距 6 cm, 株距 1 cm 左右. 用数码相机拍摄黑麦草长势图, 用遥感软件 ERA DAS /

表 2 试验处理和坡面产流指标

Tab. 2 Experimental devises and surface runoff index

No.	Influence factors	Rain intensity / $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	Grass cover / %	Straw cover / $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$	NH_4NO_3 / $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$	Slope gradient / $^\circ$	Runoff of rainfall period			Recession flow		
							Runoff time / min	Flow / mL	Flow intensity / $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	Runoff time / min	Flow / mL	Flow intensity / $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$
1	Rain intensity	0.56	0	0	43.86	15	41.60	2 082	0.05	0.30	7	0.02
2		0.68	0	0	43.86	15	58.01	5 300	0.09	0.35	18	0.05
3		0.89	0	0	43.86	15	78.03	21 902	0.28	0.43	28	0.06
4		1.01	0	0	43.86	15	80.07	25 633	0.32	0.72	70	0.09
5		1.51	0	0	43.86	15	83.72	58 849	0.71	0.87	110	0.11
6	Fertilizer	1.02	0	0	0	15	80.40	20 066	0.25	0.62	63	0.09
7		1.1	0	0	21.93	15	79.10	28 331	0.36	0.67	81	0.11
4		1.01	0	0	43.86	15	80.07	25 633	0.32	0.72	70	0.09
8		1.02	0	0	87.72	15	78.53	27 958	0.36	0.67	76	0.10
4	Straw cover	1.01	0	0	43.86	15	80.07	25 633	0.32	0.72	70	0.09
9		1.01	0	219	43.86	15	53.80	12 376	0.23	0.87	140	0.14
10		1.05	0	439	43.86	15	39.52	8 499	0.22	1.28	210	0.14
11	Grass cover	1.15	0	0	0	10	89.10	68 674	0.77	0.37	62	0.34
12		1.3	60	0	0	10	88.80	64 036	0.72	0.65	145	0.45
13		1.01	0	0	20	10	88.45	72 014	0.82	0.37	68	0.37
14		1.11	80	0	20	10	87.52	64 859	0.74	0.58	133	0.46
15		1.15	0	0	20	10	89.18	73 605	0.83	0.38	65	0.34
16		1.16	100	0	20	10	87.98	65 345	0.75	0.53	150	0.56
17		1.07	0	0	20	5	87.83	48 383	0.55	0.52	60	0.23
18	Slope gradient	1.19	0	0	20	10	86.67	73 542	0.85	0.42	62	0.30
19		1.10	0	0	20	15	86.00	76 072	0.89	0.47	50	0.22
20		1.07	0	0	20	20	86.52	70 825	0.82	0.37	44	0.24
21		1.03	0	0	20	25	83.85	64 701	0.77	0.32	40	0.26

Image8.4 分析其覆盖度,最后用目测法校正.在播种 40 d 后测得覆盖度约为 60%,进行第一次降雨试验(不施肥);播种 50 d 后拔除杂草,测得覆盖度在 80% 左右,进行第二次降雨试验;播种 82 d 后测得覆盖度约为 100%,进行第三次降雨试验.

1.3 采样和样品分析

记录地表开始产流时间,产流过程连续采集径流样.在开始产流 3 min 内采样时间为 1 min;之后每 3 min 采集 1 个径流样.降雨停止后记录坡面继续产流时间,单独采集退水径流样,测量并记录不同时刻的径流量.忽略雨期蒸发,降雨期平均产流强度和降雨结束后产流强度(退水强度) V_R 均可由下式^[10]计算:

$$V_R = 10R_u / (S \cos \alpha t) \quad (1)$$

式中: V_R 为产流强度/ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$; R_u 为径流量, mL; S 为坡面受雨面积, cm^2 ; t 为产流历时, min; α 为坡度.

测定各泥水样的总体积,取部分上清液过滤后测定径流矿质氮含量.土壤水分含量用烘干法测定,土壤质地和机械组成用比重计法测定.土壤有机质用重铬酸钾容量-外加热容量法测定;土壤 pH 值用赛多利斯 pH 计测定(土水比为 1:2.5);土壤全氮采用开氏法-自动定氮仪测定;土壤中硝态氮和铵态氮用 2N KCL 溶液浸提(土水比为 1:5),硝态氮采用紫外分光光度计测定,铵态氮用连续流动分析仪测定.

2 结果与分析

2.1 坡面退水分析

2.1.1 降雨结束后坡面退水情况

一般而言,流域出口处观测到的洪水流量过程,除包括本次降雨形成的地面径流、表层流和地下径流外,还包括前期降雨所产生洪水的退水部分以及前期降雨补给所产生的地下径流^[1].坡地水文过程具有显著的区域特征.研究表明在干旱半干旱地区一般只有地面径流产生,在湿润地区则还有地下径流和壤中流产生,且往往携带大量的溶解态污染物^[11].沈冰和王文焰^[12]室内模拟降雨试验表明,黄土坡地由于层间土壤容重差异不大,降雨期间壤中流可以忽略不计(坡度为 10% - 20% 时,壤中流沿坡向水流速度为 2-5 mm/d).对于土层深厚和包气带缺水量大的黄土坡地,地下水对坡面水文过程的影响很小.所以,壤中流和地下水对坡面退水的影响可以忽略不计.

降雨期间坡面径流量取决于降雨量与入渗、植物截流和蒸散发等各种损失量.图 1 所示为恒定雨强条件下单场降雨的流量过程线.在产流初期,坡面产流强度较小,之后逐渐上升并趋于稳定.降雨结束后,坡面产流主要受控于坡面蓄水量和坡地下垫面条件.在无雨水补给的情况下,坡面径流迅速消退,退水量和退水强度远小于降雨期地表产流(图 1 和表 2).以雨强处理为例,试验 1-5 退水量仅为降雨期地表径流总量的 0.1% - 0.3%;退水时间仅为降雨期产流历时的 0.5% - 0.9%;退水强度分别为降雨期平均产流强度的 40.45%、21.4%、28.1%、25.0% 和 21.3%,分别为降雨结束前一时段采样产流强度的 28.6%、13.6%、26.5%、15.0% 和 16.9%.这也证实黄土坡地单场降雨的退水主要是地面径流退水,无需对流量过程线进行分割.

2.1.2 降雨因素、地形地貌和管理措施等因素对黄土坡面退水的影响

黄土坡地产流以“超渗产流”为主,即当降雨强度超过表层土壤入渗能力时,坡面才会积水产流^[13].本试验降雨停止前土壤基本都处于稳定下渗阶段,坡面表层土壤达到饱和含水量.降雨停止后,坡面积水主要来自降雨期地表径流.如果不考虑植物截流和填洼等损失,坡面径流必须首先满足土壤下渗需

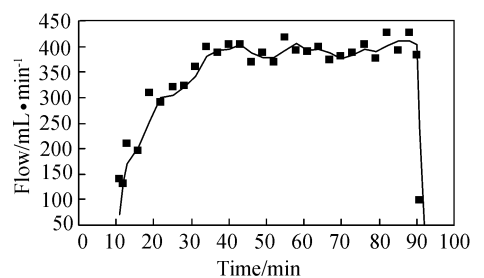


图 1 恒定雨强条件下黄土坡地流量过程线

Fig. 1 Flow graph of loess slope and with constant rain intensity

求量,其余的才能流出坡地出口断面.因此和降雨期产流一样,黄土坡地退水也符合“超渗产流”模式.今后应加强对退水期入渗过程的研究,以期进一步完善“超渗产流”的理论体系.

由于降雨停止后坡面薄层水流迅速消退,缺乏退水期土壤入渗率的相关资料,无法定量模拟坡面退水过程.本文仅通过对比分析各因素对降雨期和退水期坡面产流的影响,来研究黄土坡地退水机理.降雨强度对坡地水文过程具有决定性作用.由表 2 知,雨强对降雨停止前后坡面产流影响结果相似.随着雨强的增加,坡面降雨期产流历时、产流强度、退水历时和退水强度均呈对数增加趋势(图 2 和图 3),降雨期产流量和退水量呈线性增加关系(图 4).同种施肥措施对坡面降雨-产流过程影响很小,尤其对坡面退水几乎无影响.这是由于相同措施施肥不影响坡面径流量、径流速度、入渗过程和下垫面条件,因此降雨结束时坡面蓄水量差别甚小.与裸地对照相比,秸秆覆盖加大了地面粗糙度,减缓坡面汇流速度,使坡面水分入渗量增加.秸秆覆盖量越大,坡面产流历时越短,产流量越小.降雨结束后,坡面蓄水量较大且退水的流速较慢,所以坡面退水时间和退水量都大于裸地处理.与秸秆覆盖试验相比,牧草覆盖也有拦截雨水、减缓坡面汇流,增加坡面退水历时、退水量和退水强度的作用.然而,随着牧草覆盖度增加,退水时间却减小.这可能是由于牧草生长期内地表结皮的作用使坡面糙率减小,退水速度增加.坡度直接影响到承雨面积、坡面汇流速度和流量,对坡面蓄水量和退水过程产生一系列叠加影响.坡度越小,承雨面积越大,降雨结束时坡面积水量较大,但汇流时间也较长.在没有雨水补给的情况下,基本都是坡度越大,积水在土壤表面停留时间越短,即越快结束地表产流,退水量越小. 10° 坡地退水量较大,可能跟实际雨强较大有关.此外,坡长因素对坡面退水也有极显著的影响.其他条件一致时,坡长越长,坡面实际承雨量越多.但降雨结束时坡地蓄水量用于坡面微地形的填洼和入渗等损失量越大,坡面退水时间亦较长,因此退水强度普遍小于短坡长坡地.试验 18 与试验 3 降雨因素、地表覆盖和坡度相同,而前者退水强度约是后者的 4 倍.

降雨停止后坡面径流动能和流速显著降低,径流挟沙能力也随之减弱,侵蚀泥沙细颗粒在坡面传输途中不断沉降.本试验条件下各处理退水中泥沙仅有 0.01–0.07 g,含量极低,因此不再专门讨论.

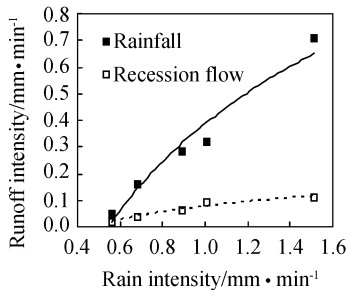


图 2 雨强对降雨期和退水期产流影响

Fig. 2 Runoff intensity of rainfall and recession flow affected by rain intensity

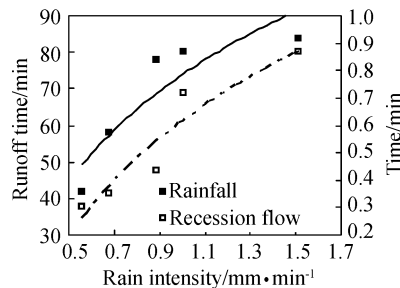


图 3 雨强对降雨期和退水期产流时间影响

Fig. 3 Runoff time of rainfall and recession flow affected by rain intensity

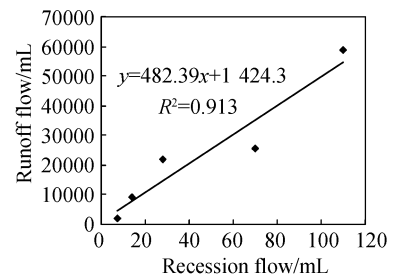


图 4 降雨期和退水期流量相关性

Fig. 4 Flow relativity of rainfall and recession period

2.2 黄土坡面退水矿质氮流失

土壤氮素在侵蚀条件下随地表径流迁移表现为三种方式:①土壤液相中的可溶性氮素在径流中的溶解;②土壤颗粒吸附的矿质氮在径流中的解吸;③土壤颗粒中的氮素随产流在坡面传递和被水体携带.研究表明土壤氮素流失过程实质是表层土壤与降雨、径流的相互作用过程,降雨和径流是土壤氮素迁移的主要动力,土壤是相互作用的界面和氮素迁移的“母体”^[14].降雨停止后,土壤矿质氮随退水的迁移过程虽然短暂,但也可以反映坡面降雨、径流与表层土壤的相互作用过程.

2.2.1 黄土坡面退水矿质氮浓度变化

在坡面产流过程中,各试验处理径流 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度基本都呈现高-低-稳定-较高变化规律(图 5).初始产流时土壤粘粒含量较高,坡面径流对土壤矿质氮的稀释、溶解和解吸作用较强,因此径流矿质氮浓度较高.随降雨的持续,表层土壤矿质氮素不断地被雨水淋洗到土层深处或随径流、泥沙迁

移,致使表层土壤矿质氮含量降低,又不能及时得到下层土壤的供给,因此径流矿质氮浓度迅速降低并趋于稳定^[15]。当降雨结束后,坡面没有雨水补给,退水成为矿质氮迁移的主要驱动力。虽然退水对矿质氮的淋洗作用明显小于降雨期坡面流,但是退水流速较小,增加了径流与表层土壤矿质氮的作用时间,使得退水中硝态氮和铵态氮浓度均高于降雨结束前一时段的径流样(表 3 和图 5)。试验 1-10 退水矿质氮浓度为降雨结束时径流浓度的 111% - 144%; 试验 11-21 退水浓度则为降雨结束时浓度的 101% - 112%。这反映坡长较长的坡地,退水与土壤矿质氮素的作用时间较长,退水矿质氮浓度增加效应相对明显。

表 3 退水矿质氮浓度与降雨结束时水样浓度比较

Tab. 3 Mineral nitrogen concentration of recession flow compared with that of runoff gathered when rainfall ceased

Experiment No.	Mineral nitrogen concentration of runoff gathered when rainfall ceased / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$		Mineral nitrogen concentration of recession flow / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$		Percent / %	
	①	②	③	④	③/①×100	④/②×100
1	8.06	0.18	11.61	0.21	144	117
2	8.4	0.27	11.49	0.35	137	130
3	8.01	0.66	9.38	0.81	117	123
4	8.14	0.49	9.76	0.59	120	120
5	8.62	0.62	9.9	0.72	115	116
6	8.01	0.35	9.02	0.45	113	129
7	8.14	0.62	9.9	0.72	122	116
8	8.27	0.51	9.29	0.68	112	133
9	8.74	0.62	10.06	0.69	115	111
10	9.81	0.51	11.16	0.57	114	112
11	8.35	0.47	8.97	0.49	107	104
12	8.6	0.48	8.81	0.51	102	106
13	8.79	0.49	8.93	0.55	102	112
14	8.34	0.51	8.93	0.57	107	112
15	8.82	0.39	8.88	0.42	101	108
16	8.57	0.52	9.29	0.58	108	112
17	7.89	0.35	8.12	0.39	103	111
18	7.65	0.3	7.99	0.31	104	103
19	7.8	0.25	8.03	0.26	103	104
20	7.75	0.25	7.98	0.28	103	112
21	7.77	0.27	8.13	0.28	105	104

①and ③are nitrate; ②and ④are ammonium nitrogen

2.2.2 黄土坡面退水矿质氮负荷量

由于黄土坡面退水量有限,退水中矿质氮负荷量在径流矿质氮总量中所占比例很小,约为 0.12% - 0.50%。各组试验退水矿质氮总量的差异主要是由于退水量不同引起。和降雨期径流矿质氮流失规律一样^[15],退水中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量很高,为退水矿质氮总量的 91.4% - 98.2%; $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量很低,仅为 1.9% - 8.6%。这是由于土壤颗粒吸附 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$,几乎不吸附 $\text{NO}_3^- \text{-N}$, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 基本上吸附于土壤颗粒表面,易随侵蚀泥沙流失,而 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 主要存在于土壤液相中,易受地表径流冲刷、溶解流失^[14]。本试验退水中泥沙含量非常低,因此,侵蚀泥沙对退水矿质氮素坡面流失的贡献率小于地表径流,具体表现为退水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度和总量远小于 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 。此外,这也说明坡面退水期产流的各项指标虽然显著小于降雨期产流,但两者与土壤矿质氮的作用规律相似,即径流与土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的相互作用明显大于与土壤 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的相互作用。

3 结论和建议

通过模拟降雨试验,结果表明黄土坡面退水以地表径流退水为主,退水时间、退水量和退水强度远

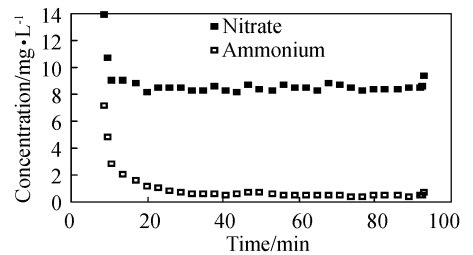


图 5 黄土坡地降雨过程径流矿质氮浓度变化

Fig. 5 Mineral nitrogen concentration of runoff on loess slope in a rain event

小于降雨期产流。降雨因素和农田管理措施等对降雨期和退水期产流规律的影响不完全一致:降雨期产流强度和退水强度均与雨强呈对数函数增加;牧草覆盖和秸秆覆盖都可以减少降雨期坡面产流强度和径流量,但却使退水时间、退水量和退水强度增加。坡度越大,退水历时越短,退水量越小;增加坡长可延长坡地退水时间,同时使退水强度降低。退水中矿质氮平均浓度普遍大于降雨结束时采样浓度,且退水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度和总量显著高于 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 。

黄土坡地退水是研究坡地水文过程、土壤水分和养分迁移的重要环节。室内模拟试验由于坡面尺寸小,退水时间短,退水的采样数目少,在一定程度上制约了退水规律的研究。在黄土高原地区,沟壑多而密度大,降水以短历时强侵蚀性暴雨为主,坡耕地退水量较大且时间较长。尤其当坡面出现强度侵蚀后,坡面高含沙退水及其农业化学物的含量不容忽视。今后应该加强野外天然降雨条件下坡地产流-污染物流失过程和影响机制研究,以全面深入分析干旱和半干旱地区坡地退水和污染物负荷规律。

参考文献 References

- [1] 廖松,王燕生,王路.工程水文学[M].北京:清华大学出版社,1990:33,54-55.
LIAO Song, WANG Yan sheng, WANG Lu. Engineering Hydrology [M]. Beijing: Press of Tsinghua University [M]. 1990: 33, 54-55.
- [2] 杨聪,于静洁,刘昌明,等.华北山区坡地产流规律试验研究[J].地理学报,2005,60(6):1021-1028.
YANG Cong, YU Jing jie, LIU Chang ming, et al. Experimental Study on Slope Runoff Generation Process in North China Mountainous Area [J]. Acta Geographica Sinica, 2005, 60(6): 1021-1028.
- [3] AMDERSPM M G, BURT T P. Interpretation of recession flow [J]. Journal of Hydrology, 1980(46): 89-101.
- [4] ZECH AIRAS Y B, BRUTSAERT W. Recession characteristics of ground water out flow and base flow from mountainous watersheds [J]. Water Resources Research, 1988, 24(10): 1651-1658.
- [5] BOUGHTON W C. Base flow recessions [J]. Australian Civil Engineering Transactions, 1995(37): 9-13
- [6] WITTENBERG H. Base flow recession and recharge as nonlinear storage processes [J]. Hydrological Processes, 1999(13): 715-726.
- [7] CHAPMAN T G. Modeling stream recession flows [J]. Environmental Modeling & Software, 2003(18): 683-692.
- [8] SMAKHTIN V U. Low flow hydrology: a review [J]. Journal of Hydrology, 2001(240): 147-186.
- [9] 李发东,宋献方,刘昌明等.华北典型山区坡地径流的退水过程研究[J].北京林业大学学报,2006,28(2):79-85.
LI Fa dong, SONG Xian fang, LIU Chang ming, et al. Discharge recession from runoff plots in representative mountain area in North China [J]. Journal Beijing Forestry University, 2006, 28(2): 79-85.
- [10] 李裕元,邵明安.降雨条件下坡地水分转化特征试验研究[J].水利学报,2004(4):48-51.
LI Yu yuan, SHAO Ming an. Experimental study on characteristics of water transformation on slope land [J]. J. of hydrology, 2004(4): 48-51.
- [11] 傅涛,魏朝富,谢德体.坡耕地水土流失特征与耕作措施研究[C]//土壤物理与生态环境建设研究文集.西安:陕西科学技术出版社,2001:273-279.
FU Tao, WEI Chao fu, XIE De lin. Study on soil and water erosion and cultivated measure on slope farm land [C]// Soil physics and ecosystem construction. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2001: 273-279.
- [12] 沈冰,王文焰.降雨条件下黄土坡地表层土壤水分运动实验与数值模拟的研究[J].水利学报,1992(6):29-35.
SHEN Bin, WANG Wen yan. Experiment and simulation on soil water movement on the upper layer of loess slope under the raining condition [J]. J. of Hydrology, 1992(6): 29-35.
- [13] 赵人俊.流域水文模型参数的客观优化方法[J].水文,1993(4):21-24.
ZHAO Ren Jun. Parameters objective optimize methods of field hydrographic models [J]. J. of hydrography, 1993(4): 21-24.
- [14] ZHANG Xing chang, SHAO Ming an. Effects of vegetation coverage and management practice on soil nitrogen loss by erosion in a hilly region of the loess plateau in China [J]. Acta Botanica Sinica, 2003, 45(10): 1195-1203.
- [15] 张亚丽,张兴昌,邵明安,等.降雨强度对黄土坡面土壤矿质氮素径流流失影响[J].农业工程学报,2004,20(3):55-58.
ZHANG Ya li, ZHANG Xing chang, SHAO Ming an, et al. The impact of the rainfall intensity on the soil mineral nitrogen loss by runoff on the loess slope [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(3): 55-58.

(编辑 李斌)

(下转第77页)

XIONG Jiar qing, WAN Xiaochang. Problems of Urban Sewage Reutilization Planning[J]. J. of Xi'an University of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2004, 36(1): 66-74. (编辑 李斌)

Carrying capacity of water resources of Baoji city based on the system dynamics model

SUN Xinxin¹, SHEN Bing¹, YU Junli², LIU Xingjian², MO Shuhong¹

(1. Xi'an University of Technology, Key Lab of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE, Xi'an 710048, China; 2.)

Abstract: Water resources carrying capacity is an important component of a variety of nature carrying capacity in the course of regional sustainable development, and plays an important role in regional development planning. Based on the local system characteristics of water resources in Baoji, system dynamics (SD) model was used to simulate the water resources carrying capacity in the present paper. According to systematic theory and cause effect analysis of the complicated system, SD model of water resources carrying capacity was established and divided into 5 subsystems. The policy effects on the water resources carrying capacity were tested through policy control factors. Finally, on the ground of the simulation results, the best scheme and some suggestions were put forward.

Key words: Baoji city; water resources carrying capacity; system dynamics model

Biography: SUN Xinxin, Candidate for Master, Xi'an 710048, P. R. China, Tel: 0086 29 82312028, E-mail: sunxx1216@126.com

(上接第 71 页)

Research of recession flow on the loess slope and its nitrogen pollution

ZHANG Ya-li^{1,2}, LI Huai-en¹, ZHANG Xing-chang^{2,3}, XIAO Bo²

(1. Northwest Water Resources and Environment Ecology Key Laboratory of MOE, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS, State Key Lab. of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Yangling 712100, China; 3. Northwestern Sci-tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China)

Abstract: The recession flow on loess slope and its chemicals release and transport are important for studying the sloping field hydrographic process and soil chemicals loss by runoff. Based on the artificial rainfall experiments on loess slope land, the recession flow and the influential factors, such as rainfall, topography, and physiognomy, and agricultural managements are analyzed in this paper. Meanwhile, from the interaction of rainfall, runoff and soil, the mineral nitrogen concentration and loads of recession flow are discussed. The results are as follows. First, the recession flow on loess slope mainly originates from surface runoff, and the residue time, volume and intensity of it are much less than that of surface runoff in a rain session. Second, rainfall, topography and physiognomy, as well as the surface cover greatly affect the recession flow. Runoff intensity and recession flow intensity are both increasing with the rain intensity in a form of logarithm function. Third, the recession flow's velocity is so slow and the interaction time with surface soil is so long that the mineral nitrogen concentration of it is usually more than that of the runoff when the rain terminates, especially for a long slope. Finally, there are much more soil nitrate than soil ammonium in the recession flow.

Key words: artificial rainfall; loess slope land; recession flow; mineral nitrogen loads; influential factors

***Biography:** ZHANG Ya-li, Candidate for Ph. D., Xi'an 710048, P. R. China, Tel: 0086 29 88065077, E-mail: skyali@163.com