

DOI: 10.5846/stxb201108121182

张彦军, 郭胜利, 南雅芳, 李俊超. 水土流失治理措施对小流域土壤有机碳和全氮的影响. 生态学报 2012, 32(18): 5777-5785.

Zhang Y J, Guo S L, Nan Y F, Li J C. Effects of soil erosion control measures on soil organic carbon and total nitrogen in a small watershed. Acta Ecologica Sinica 2012, 32(18): 5777-5785.

# 水土流失治理措施对小流域土壤有机碳和全氮的影响

张彦军<sup>1</sup>, 郭胜利<sup>1,2,\*</sup>, 南雅芳<sup>1</sup>, 李俊超<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100;

2. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100)

**摘要:**明确综合治理条件下小流域土壤有机碳 (Soil organic carbon, SOC) 和全氮 (Total nitrogen, TN) 的空间分布特征及其影响因素, 对科学评价水土流失区土壤固碳潜力具有重要意义。以黄土高原丘陵沟壑区典型小流域 (砖窑沟流域) 为对象, 基于流域内 3 种典型地貌类型 (梁峁坡、沟坡、沟谷) 和 3 种典型水土流失治理措施 (水平梯田、林地和草地措施, 坡耕地为对照), 采集土壤样品 737 个, 研究地貌类型和水土流失治理措施对小流域 SOC 和 TN 变化的影响。结果表明, 同一地貌类型上, 水平梯田、林地和草地措施的 SOC 和 TN (0—10 cm 土层) 含量均显著高于坡耕地 ( $P < 0.1$ )。梁峁坡上, 水平梯田、林地和草地措施条件下的 SOC 和 TN 含量较坡耕地依次提高了 18% 和 24%、70% 和 59%、25% 和 21%; 沟坡上, 林地和草地措施的 SOC 和 TN 较坡耕地依次提高了 76% 和 54%、25% 和 27%。同一治理措施在不同地貌类型间对 0—10 cm 土层 SOC 和 TN 的影响存在显著差异 ( $P < 0.1$ )。水平梯田条件下, 沟谷的 SOC 和 TN 含量比梁峁坡提高了 46% 和 43%; 林地措施条件下, 沟谷的 SOC 和 TN 含量比梁峁坡提高了 18% 和 6%; 草地措施条件下, 沟谷的 SOC 和 TN 含量比梁峁坡提高了 14% 和 18%。0—100 cm 土层的 SOC 或 TN 在不同地貌类型或不同治理措施间的差异与土壤水分含量 (Soil moisture, SM) 的变化趋势基本一致, 并且 SOC 或 TN 与 SM 呈指数关系  $y = ae^{bx}$  ( $y$  为 SOC 或 TN,  $x$  为 SM)。

**关键词:**地貌类型; 治理措施; 土壤有机碳; 全氮; 土壤水分

## Effects of soil erosion control measures on soil organic carbon and total nitrogen in a small watershed

ZHANG Yanjun<sup>1</sup>, GUO Shengli<sup>1,2,\*</sup>, NAN Yafang<sup>1</sup>, LI Junchao<sup>1</sup>

1 College of Resource and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry land Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi 712100, China

**Abstract:** It is significance of assessing soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) sequestration potential to understand dynamics of soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) at a small watershed with comprehensive measures in the loess region of China. Based on three topographic positions (Ridge slope, Gully slope, Valley bottom) and three control measures for soil erosion (Level terrace, Woodland measures, Grassland measures), 737 soil samples were collected to investigate effects of topographic positions and soil erosion control measures on soil organic carbon and total nitrogen at Zhuan Yaogou watershed in the hilly region of Loess Plateau. Under the similar topographic positions, SOC and TN (0—10 cm soil layer) in level terrace, woodland and grassland were significantly higher than those in cropland on sloping land ( $P < 0.1$ ). For the ridge slope, SOC and TN in level terrace, woodland and grassland were 18% and 24%, 70% and 59%, and 25% and 21% higher than that in cropland on sloping land, respectively; For the gully slope, SOC

基金项目: 国家自然科学基金资助 (40771125)

收稿日期: 2011-08-12; 修订日期: 2012-05-22

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: slguo@ms.iswc.ac.cn

<http://www.ecologica.cn>

and TN in woodland and grassland were 76% and 54% , and 25% and 27% higher than that in cropland on sloping land , respectively. The similar control measures for soil erosion produced significant differences among topographic positions ( $P < 0.1$ ) . In the 0—10 cm soil layer , For the level terrace measure , SOC and TN in valley bottom were 46% and 43% higher than those in the ridge slope; For the woodland measures , SOC and TN in the gully slope were 18% and 6% higher than those in the ridge slope; For the grassland measures , SOC and TN in the gully slope were 14% and 18% higher than those in the ridge slope. In the 0—100 cm soil depth , SOC or TN had the similar change characteristics with soil moisture among the topographic positions and the soil erosion control measures. An exponential relationships of  $y = ae^{bx}$  ( $y$  is SOC or TN and  $x$  is soil moisture) were developed between SOC ( TN) and soil moisture at the small watershed.

**Key Words:** topographic positions; soil erosion control measures; soil organic carbon; total nitrogen; soil moisture

水土流失是导致土壤有机碳库流失和土壤退化的重要因素<sup>[1]</sup>。水土流失治理可显著改善土壤质量,提高陆地生态系统碳积累。据 Lal<sup>[2-4]</sup> 估计,全球水土流失治理的固碳潜力为 1.47—3.04 Pg C/a。土壤有机碳库的恢复不仅有助于改善土壤持水性能、提高土壤质量而且有助于维护生态系统的结构与功能。因此,了解水土流失治理条件下土壤有机碳(SOC)和总氮(TN)的变化及其影响因素,对科学评价水土流失区土壤固碳潜力和碳循环具有重要意义。

黄土高原地区沟壑纵横、地形破碎,水土流失严重<sup>[5]</sup>。小流域既是黄土区产流产沙的基本单元,也是该区治理水土流失的基本单元。在水土流失严重的丘陵沟壑区,梁峁坡、沟坡及各类沟谷中,地形严重影响着小流域内水土流失状况<sup>[6-7]</sup>,支配着水、热资源的空间分布<sup>[8-9]</sup>,决定着植被群落的空间配置,从而影响水土流失治理措施的空间配置<sup>[10-11]</sup>。例如,在丘陵沟壑区的燕沟流域,依据立地条件进行综合治理,梁峁坡上建立了乔—灌—草混交植被措施,沟坡则配置了乔—灌混交以及经济林果措施,而沟谷则建造速生用材林,水土流失治理措施的合理配置,显著降低了流域的产沙量,提高了流域土壤生产力和土壤质量<sup>[12]</sup>。除地形因素外,植被措施的差异也会显著影响 SOC 和 TN 的积累。此外,即使同一植被措施条件下,也会因地形差异影响 SOC 和 TN 的积累<sup>[13-14]</sup>。

目前,大量的研究集中于土地利用方式的变化或单一水土流失治理措施对 SOC 和 TN 的影响<sup>[15-20]</sup>。但从小流域角度,研究同一治理措施在不同地形部位或同一地形部位上不同治理措施间 SOC 和 TN 积累的差异的报道不多。因此,从地形和治理措施角度研究流域内 SOC 和 TN 的变化有助于深入理解黄土区水土流失治理对陆地生态系统碳循环的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

砖窑沟流域(39°11'06"—39°13'47" N, 111°12'03"—111°19'28" E) 位于晋西北河曲县沙坪乡,地势东高西低,海拔 845—1244 m,主沟方向为东西向,长约 14.2 km,支沟从南北两面汇入,南北剖面呈凹形,分水岭与沟底高差达 150—200 m,起伏剧烈。流域沟壑密度为 6.24 km/km<sup>2</sup>,沟谷切割深度一般在 50—100m 之间,有的高达 200m 左右。流域(黄土丘陵沟壑区)地貌类型由梁峁坡、沟坡和沟谷组成,三者 in 流域内所占的比例分别为 47.7%、47.3%、5.0%。流域内坡度在 0°—15°范围之间的土地面积占整个流域面积的 40.40%; 15°—25°之间占 29.81%; 25°—35°之间占 12.44%; >35°的占 17.35%。

流域属大陆性季风气候,年平均降水量 447.5 mm,蒸发量 1913.7 mm,年内降雨主要集中在 6—9 月份,其中 7、8 两月份占全年降水量的 52.3%,并多为大雨和暴雨。 $\geq 10^{\circ}\text{C}$  的积温天数为 140 d,无霜期为 156 d,全年日照达 2856 h。多年平均大风日数 87.2 d。以春季最多,占 41.64%。流域土壤侵蚀以水蚀为主,“七五”初年平均水蚀模数为 12000 t·km<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。地面割裂度为 55.1%,年土壤侵蚀模数 >20000 t/km<sup>2</sup>,属于剧烈侵蚀。流域的土壤以栗褐土为主,土壤层次发育不明显,多表现出母质性状,质地偏轻,有机质含量一般在 0.50% 左右,全 N、全 P 仅 0.04% 和 0.05%,全 K 含量 2.00% 左右。

<http://www.ecologica.cn>

流域植被类型多样,属温暖带森林草原气候,主要农作物有糜子(*Panicum miliaceum* L.)、玉米(*Zea mays* L.)、谷子(*Setaria italica*)等;林地包括乔木林和灌木林,乔木林地主要有刺槐(*Robinia pseudoacacia*)林、小杨树(*Populus simonii* Carr.)林、沙枣(*Elaeagnus angustifolia* L.)林等,灌木林有柠条(*Caragana Korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*);草地分为人工草地和天然草地两种类型,其中人工草地主要有苜蓿(*Medicago sativa* L.)、香蒲(*Typha orientalis* Presl)、沙打旺(*Astragalus adsurgens* Pall)等,天然草地主要有草木樨(*Melilotus suaveolens* Ledeb)、冰草(*Agropyron cristatum* L. Gaertn)等类型。

## 1.2 测定项目及方法

### 1.2.1 土壤采集

基于小流域内的地貌类型和治理措施两大因素,采用“分层次采样的方法”,采集土壤样品。将地貌类型(梁峁坡、沟坡和沟谷)作为一级层次,将同一地貌类型条件下的不同治理措施(坡耕地(对照)、水平梯田、林地措施、草地措施)作为二级层次。在流域内,以横断面思路为依据,采集土壤样品,每个采样点3—5次重复(“S”型路线),并充分考虑空间异质性,在沿途进行补点采样。3种地貌类型在野外的判别依据为:沟缘线以上为梁峁坡(包括峁顶),沟缘线以下到坡脚线以上为沟坡,多个坡脚线之间相对平坦的地区为沟谷(图1)。结合砖窑沟流域的实际情况于2010年9月进行为期4d的采样。采样时利用GPS定位,并记录每个



图1 流域典型地貌类型图

Fig.1 Typically landforms maps at the small watershed

采样点的海拔、经纬度、地貌类型、治理措施等信息。在流域尺度上采集不同地貌类型、不同治理措施的土壤样本97个,其中0—20cm土层采集了60个土壤样本,0—40cm土层采集了20个土壤样本,0—100cm土层采集了17个土壤样本。每个样本分别取0—10、10—20、20—40、40—60、60—80、80—100cm共6个层次,共计737个土壤样品。采样土钻直径为3cm。

### 1.2.2 样品分析

新鲜样品混合均匀后,用部分样品测土壤水分(SM)(烘干法),剩余样品在室内进行自然风干,风干样品过0.25mm筛后,测定SOC( $H_2SO_4-K_2Cr_2O_7$ 外加法)含量(g/kg),TN(凯氏定氮法)含量(g/kg)(自动定氮仪BUCHI322/343)。

## 1.3 数据处理与统计分析

利用Excel软件进行数据的预处理,用Sigmplot软件做SOC和TN以及SM相关图,用SAS软件的UNIVARIATE plot normal程序包对数据进行正态分布检验。利用SAS软件PROC reg程序包对分析获得的SOC(因变量)和TN(自变量)进行回归分析,所获回归方程的斜率反映了土壤C:N的平均值<sup>[19]</sup>。并用SAS软件对不同地貌类型和不同治理措施条件下的SOC、TN和SM进行了方差分析(GLM),当F检验显著时在进行3种地貌类型(梁峁坡、沟坡、沟谷)和3种治理措施(坡耕地(对照)、水平梯田、林地措施、草地措施)均值间的Duncan检验,对同一地貌类型条件下不同治理措施以及同一治理措施条件下不同地貌类型进行方差分析(GLM),当F检验显著时,进行均值间的Duncan检验。所有方差分析 $\alpha=0.1$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤有机碳、全氮、以及土壤水分变异的影响因子

流域表层SOC含量的变化范围为1.05—17.60g/kg,均值为4.39g/kg,数据接近正态分布( $W=0.8839$ );TN含量的变化范围为0.05—1.38g/kg,均值为0.38g/kg,近似正态分布( $W=0.9150$ );SM的变化范围为7.27%—19.35%,均值为12.46%,近似正态分布( $W=0.9759$ )。治理措施、土层深度、地貌类型及

其交互作用对流域土壤 SOC、TN 以及 SM 的空间分布有显著影响 ( $P < 0.1$ ) (表 1)。

表 1 小流域内的土壤有机碳、全氮以及土壤水分的空间分布影响因子方差分析

Table 1 Variance analysis of spatial distribution of soil organic carbon, total nitrogen and soil moisture in watershed

项目 Item	df	土壤有机碳 SOC				全氮 TN				土壤水分 SM			
		SS	MS	F	$P_r > F$	SS	MS	F	$P_r > F$	SS	MS	F	$P_r > F$
C	3	18.39	6.13	0.11	0.04	2.85	0.0365	3.49	0.0155	267.91	89.30	35.62	<0.001
D	5	505.85	101.17	3.43	0.69	54.32	<0.0001	57.55	<0.0001	2390.77	478.15	190.72	<0.001
L	2	30.40	15.20	0.23	0.11	8.95	0.0001	8.65	0.0002	550.63	275.32	42.10	<0.0001
C×L	3	14.26	4.75	0.12	0.04	3.26	0.0210	2.70	0.0445	71.10	23.70	3.62	0.0129
C×D	15	161.25	10.75	0.99	0.07	5.21	<0.0001	6.11	<0.0001	93.86	6.26	0.96	0.4999
D×L	10	13.49	1.35	0.15	0.02	1.21	0.2834	0.77	0.6603	615.25	61.53	9.41	<0.0001
C×D×L	9	5.47	0.61	0.12	0.01	1.05	0.3970	0.35	0.9593	98.37	10.93	1.67	0.0920

C: 治理措施 Soil erosion control measures; D: 土层深度 Soil depth; L: 地貌类型 topographic positions; SOC: Soil organic carbon; TN: Total nitrogen; SM: Soil moisture; df: 自由度 Degree of freedom; SS: 平方和 Sum of squares; MS: 均方 Mean square

### 2.2 治理措施对土壤有机碳、全氮以及土壤水分的影响

同一地貌类型条件下 治理措施对 SOC、TN 以及 SM 都有显著影响 ( $P < 0.1$ ) (图 2)。

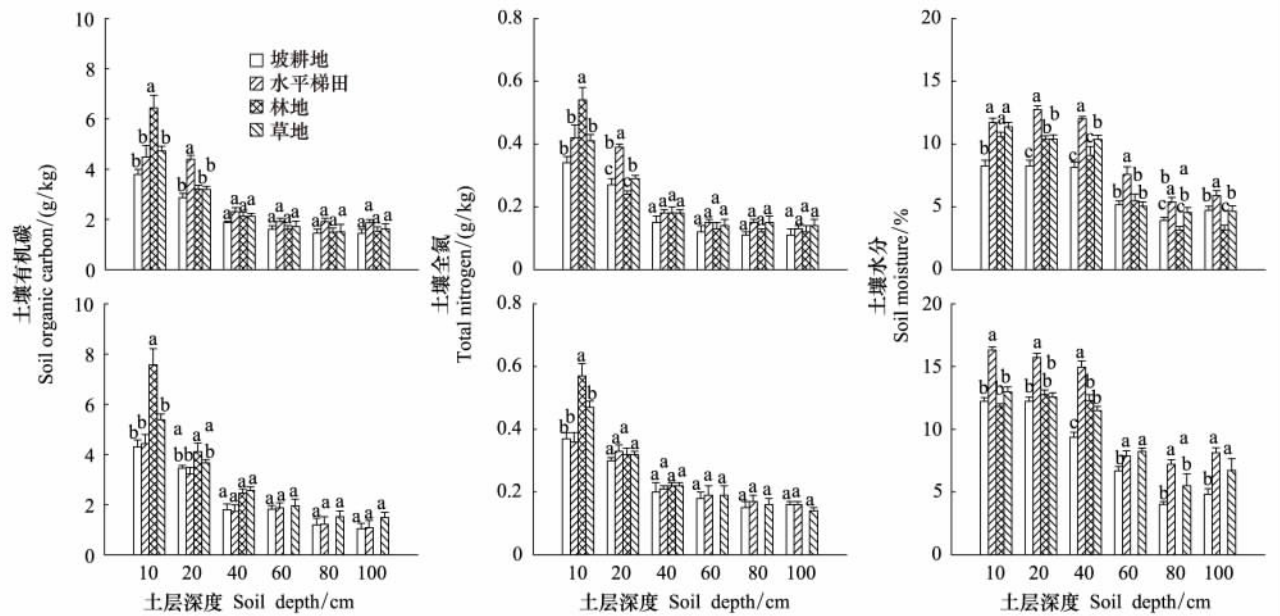


图 2 治理措施对土壤有碳、全氮以及土壤水分的影响

Fig. 2 Effect of control measures on soil organic carbon total nitrogen and soil moisture

第一行为坡地; 第二行为沟坡; 不同小写字母表示差异显著

梁峁坡上,与坡耕地相比,在 0—10 cm 土层,林地的 SOC (6.43 g/kg) 含量提高了 70%,但水平梯田、草地措施在 0—10 cm 土层的 SOC 含量与其差异不显著 ( $P > 0.1$ );在 10—20 cm 土层,水平梯田的 SOC (4.4 g/kg) 含量较坡耕地的 SOC 含量提高了 54%,而林地措施和草地措施的 SOC 含量与坡耕地的 SOC 含量差异不显著 ( $P > 0.1$ );在 20—100 cm 土层,水平梯田、林地措施和草地措施的 SOC 含量均与坡耕地的 SOC 含量差异不显著 ( $P > 0.1$ )。在 0—100 cm 土层, TN 含量与 SOC 含量的变化规律相似。

沟坡条件下,在 0—10 cm 土层,林地的 SOC (7.57 g/kg) 含量较坡耕地的 SOC 含量提高了 76%,而水平梯田、草地措施的 SOC 含量与坡耕地的 SOC 含量差异不显著 ( $P > 0.1$ );在 10—20 cm 土层,林地措施的 SOC (4.11 g/kg) 含量较坡耕地的 SOC (3.45 g/kg) 含量提高了 19%,而水平梯田、草地措施的 SOC 含量与坡耕地的 SOC (3.45 g/kg) 含量差异不显著 ( $P > 0.1$ );在 20—100 cm 土层,水平梯田、林地措施和草地措施的 SOC

含量与坡耕地的 SOC 含量差异不显著 ( $P>0.1$ )。不同措施间的 TN 含量在 0—100 cm 土层与 SOC 含量有着近似的规律。

梁峁坡上或沟坡上生物治理措施均显著影响 SM 的空间分布 ( $P<0.1$ )。0—100 cm 土层, SM 呈现出水平梯田>林地或草地措施>坡耕地的趋势(图 2)。

### 2.3 地貌类型对土壤有机碳、全氮以及土壤水分的影响

同一治理措施条件下, SOC、TN 以及 SM 因地貌类型存在显著差异 ( $P<0.1$ ) (图 3)。

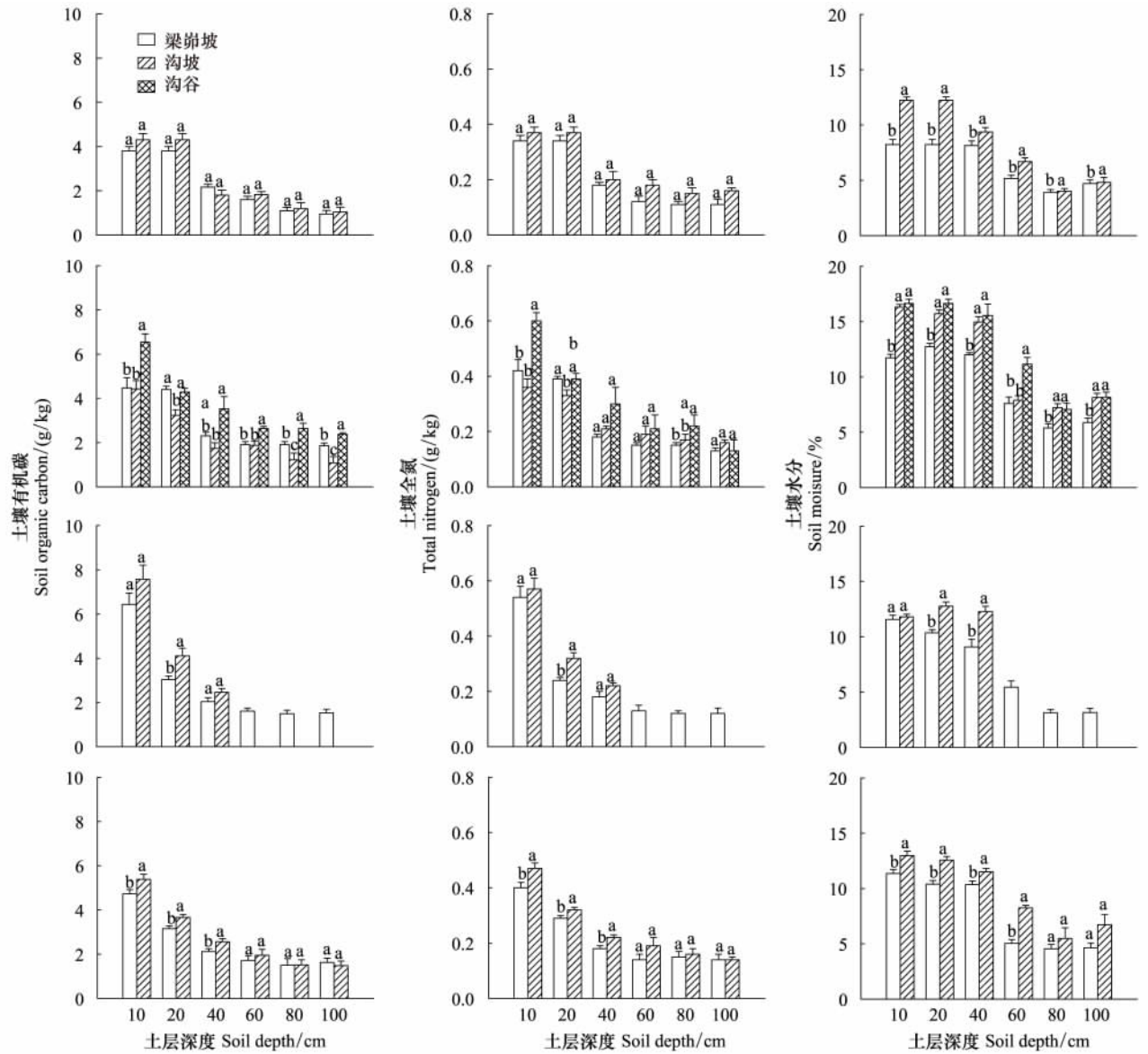


图 3 地貌类型对土壤有机碳、全氮以及土壤水分的影响

Fig. 3 Effect of topographic positions on soil organic carbon, total nitrogen and soil moisture

第一行为坡耕地; 第二行为水平梯田措施; 第三行为林地措施; 第四行为草地措施

坡耕地条件下, 与梁峁坡相比, 在 0—100 cm 土层, 沟坡的 SOC 和 TN 的含量与其差异不显著 ( $P>0.1$ )。水平梯田措施条件下, 与梁峁坡相比, 在 0—10 cm 土层, 沟谷的 SOC (6.54 g/kg) 含量提高了 46%, 而沟坡的 SOC (4.43 g/kg) 含量与梁峁坡的 SOC (4.47 g/kg) 含量差异不显著 ( $P>0.1$ ); 在 10—20 cm 土层, 沟坡的 SOC (3.23 g/kg) 含量较梁峁坡的 SOC (4.4 g/kg) 含量减少了 27%, 而沟谷的 SOC (4.28 g/kg) 含量与梁峁坡的 SOC (4.4 g/kg) 含量差异不显著 ( $P>0.1$ ); 在 20—40 cm 土层, 沟谷和沟坡的 SOC 含量都均与梁峁坡的



SOC 含量差异不显著 ( $P>0.1$ ); 在 40—60 cm 土层, 沟谷的 SOC (2.63 g/kg) 含量较梁峁坡的 SOC (1.91 g/kg) 含量提高了 38%, 而沟坡的 SOC (1.87 g/kg) 含量与梁峁坡的 SOC (1.91 g/kg) 含量差异不显著 ( $P>0.1$ ); 在 60—80 cm 土层, 沟谷的 SOC (2.63 g/kg) 较梁峁坡的 SOC (1.91 g/kg) 含量提高了 38%, 而沟坡的 SOC (1.22 g/kg) 的含量较梁峁坡的 SOC (1.91 g/kg) 含量减少了 36%; 在 80—100 cm 土层, 沟谷的 SOC (2.37 g/kg) 较梁峁坡的 SOC (1.86 g/kg) 提高了 27%, 而沟坡的 SOC (1.09 g/kg) 的含量较梁峁坡的 SOC (1.86 g/kg) 含量减少了 41%。在 0—40 cm 土层, 地貌类型间的 TN 含量与 SOC 含量的变化规律类似, 但地貌类型间的 TN 含量的变化规律在 40—100 cm 土层与 SOC 变化不一致。

林地措施条件下, 与梁峁坡相比, 在 0—10 cm 和 20—40 cm 土层, 沟坡的 SOC 含量与其差异不显著 ( $P>0.1$ ); 但在 10—20 cm 土层, 沟坡的 SOC (4.11 g/kg) 含量较梁峁坡的 SOC (3.04 g/kg) 含量提高了 35%。在 0—40 cm 土层, TN 含量与 SOC 的变化规律一致。草地措施条件下, 与梁峁坡相比, 在 0—10 cm 土层, 沟坡的 SOC (5.38 g/kg) 含量较梁峁坡的 SOC (4.73 g/kg) 含量提高了 14%; 在 10—20 cm 土层, 沟坡的 SOC (3.66 g/kg) 含量较梁峁坡的 SOC (3.15 g/kg) 含量提高了 16%; 在 20—40 cm 土层, 沟坡的 SOC (2.56 g/kg) 含量较梁峁坡的 SOC (2.12 g/kg) 含量提高了 21%; 在 40—100 cm 土层, 沟坡的 SOC 含量与梁峁坡的 SOC 含量差异不显著 ( $P>0.1$ )。TN 在 0—100 cm 土层与 SOC 的变化规律一致。

地貌类型也显著影响流域 SM 的空间分布 ( $P<0.1$ ) (图 3)。0—100 cm 土层, 坡耕地、林地以及草地治理措施条件下, SM 均呈现出沟坡>峁坡的趋势; 在水平梯田条件下, SM 则呈现出沟谷>沟坡>峁坡的趋势。

### 3 讨论

流域的 SOC 和 TN 含量因治理措施而不同 (图 2)。无论梁峁坡还是沟坡, 与坡耕地相比较而言, 水平梯田、林地措施和草地措施均提高了 SOC 和 TN 的含量。这一结果与已有报道基本一致<sup>[15-17, 19-20]</sup>。在水土流失区, 治理措施的减沙、减流可能是导致 SOC 和 TN 改善的重要原因<sup>[21-22]</sup>, 同时植被的性状对 SOC 和 TN 影响也不容忽视<sup>[23-26]</sup>。据本流域野外观测资料显示 (1988—1989 年) 3 次特大暴雨的裸露沟坡和治理沟坡平均产沙量分别为 1252 t/km<sup>2</sup> 和 1.8 t/km<sup>2</sup>, 产流量分别为 10910 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup> 和 109 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>; 在坡度、坡长、小区面积近似的条件下, 水平梯田和林地措施以及坡耕地的土壤侵蚀模数分别为 0.21、1.147 t/km<sup>2</sup><sup>[22]</sup>。林地措施或草地措施的 SOC 和 TN 含量高于坡耕地的 SOC 和 TN 含量, 可能与不同措施间归还到土壤中的有机物的输入量、性质的差异有关: (1) 林地和草地的有机物输入量高于农田, 例如, 林地总输入量为 242.5 t/hm<sup>2</sup>; 草地总输入量为 28.0 t/hm<sup>2</sup>; 农田总输入量为 20.1 t/hm<sup>2</sup><sup>[23-24]</sup>。(2) 林地、草地条件下输入土壤的有机物降解性要难于坡耕地, 例如黄土高原丘陵沟壑区, 林地、草地、农田的 C:N 分别为 11.46、10.26 和 9.78<sup>[25]</sup>。(3) 不同种类有机物质的生化特征不同<sup>[26]</sup>。

同一治理措施在不同地貌类型间的作用存在着差异 (图 3)。流域尺度上, 由于峁坡、沟坡以及沟谷的不同坡度导致了水分及其水土流失的分异。例如, 同一林草措施条件下, 在 0—40 cm 土层, 沟坡的 SM 为 12.4% 而峁坡的 SM 为 10.6% (图 3); 在干旱半干旱的黄土高原地区, 水分的差异通过影响植物的生长状况<sup>[27-28]</sup>, 从而进一步影响有机物向土壤中的归还量<sup>[29]</sup>和 SOC (TN) 的积累<sup>[26, 30]</sup>。研究认为 25° 是黄土高原地区梁峁坡和沟坡的分界线<sup>[31]</sup>, 也是该地区发生土壤侵蚀的临界坡度<sup>[32]</sup>, 因此, 沟坡承接了来自梁峁坡上流失的水、土, 从而使沟坡的水土流失量却低于梁峁坡, 继而造成梁峁坡和沟坡上 SOC 和 TN 的积累不同, 呈现出梁峁坡低于沟坡的趋势 (图 3)。

在黄土高原地区, 水分因地形或治理措施在流域空间分布上发生显著变化 (图 2、图 3), 不同地形部位间或不同治理措施条件下的 SOC (TN) 含量均与 SM 具有显著的指数关系 (表 2)。在半干旱地区, 水分是植被生长的主要限制性因素, 低洼地形部位相对适宜的水分条件促进了植被的生长和有机物向土壤的归还量, 进而提高了 SOC 和 TN 的含量。但流域内土壤水碳、氮成指数增加关系的具体机理有待进一步研究。

地貌类型或治理措施对流域土壤 C:N 影响显著 ( $P<0.1$ ) (表 3), 同一地貌类型条件下, 均呈现出林地措施>草地措施>坡耕地>水平梯田的趋势, 究其原因可能与碳氮的积累速度以及有机物本身的化学性质的差异

有关<sup>[19, 33]</sup>; 在同一治理措施条件下, 水平梯田条件下土壤 C:N 呈现出沟坡>梁峁坡>沟谷的趋势, 在坡耕地、林地措施、草地措施条件下则呈现出沟坡>梁峁坡的趋势, 可能与流域土层内土壤微生物的群落结构、数量以及活性的差异有关<sup>[34-35]</sup>。

表 2 流域内土壤水分与土壤有机碳、全氮的关系

Table 2 Relationships between soil moisture and soil organic carbon or total nitrogen in small watershed of Loess Plateau

治理措施 Soil erosion control measures	地貌类型 Topographic positions	土壤水分和土壤有机碳的关系 Relationships between soil moisture and soil organic carbon				土壤水分和土壤全氮的关系 Relationships between soil moisture and total nitrogen			
		回归方程 Regression equations	样本数 Numbers of samples	$R^2$	$P_r > F$	回归方程 Regression equations	样本数 Numbers of samples	$R^2$	$P_r > F$
坡耕地 cultivated slope-land	梁峁坡	$y = 0.6765e^{0.1729x}$	15	0.53	0.0022	$y = 0.0548e^{0.1754x}$	15	0.55	0.0015
	沟坡	$y = 2.2765e^{0.0501x}$	19	0.42	0.0028	$y = 0.2038e^{0.0459x}$	19	0.34	0.0085
水平梯田 Level terrace	梁峁坡	$y = 1.1252e^{0.0854x}$	47	0.40	<0.0001	$y = 0.0769e^{0.1024x}$	47	0.44	<0.0001
	沟坡	$y = 0.4596e^{0.1281x}$	15	0.61	0.0006	$y = 0.0889e^{0.0825x}$	15	0.71	<0.0001
林地措施 Woodland measures	梁峁坡	$y = 0.8286e^{0.1443x}$	65	0.55	<0.0001	$y = 0.0778e^{0.1270x}$	66	0.46	<0.0001
	沟坡	$y = 0.8929e^{0.1027x}$	11	0.12	0.3014	$y = 0.0387e^{0.1628x}$	11	0.41	0.0351
草地措施 Grassland measures	梁峁坡	$y = 0.9990e^{0.0995x}$	57	0.46	<0.0001	$y = 0.0751e^{0.1193x}$	61	0.48	<0.0001
	沟坡	$y = 1.5995e^{0.0615x}$	103	0.18	<0.0001	$y = 0.1276e^{0.0691x}$	101	0.27	<0.0001

表 3 地貌类型和治理措施对土壤碳氮比的影响

Table 3 Effects of topographic positions and control measurements on soil carbon to nitrogen ratio

治理措施 Soil erosion control measures	地貌类型 Topographic positions	回归方程 Regression equations	样本数 Numbers of samples	相关系数 $R^2$ Correlation coefficients	$P_r > F$
坡耕地 cultivated slope-land	梁峁坡	$y = 10.74x + 0.28$	66	0.92	<0.0001
	沟坡	$y = 12.37x - 0.40$	44	0.90	<0.0001
水平梯田 Level terrace	梁峁坡	$y = 10.00x + 0.40$	113	0.90	<0.0001
	沟坡	$y = 12.27x - 0.67$	24	0.86	<0.0001
林地措施 Woodland measures	梁峁坡	$y = 8.54x + 0.90$	56	0.86	<0.0001
	沟坡	$y = 11.96x + 0.11$	109	0.97	<0.0001
草地措施 Grassland measures	梁峁坡	$y = 13.24x - 0.33$	34	0.94	<0.0001
	沟坡	$y = 11.00x + 0.13$	131	0.89	<0.0001
	沟坡	$y = 12.44x - 0.26$	180	0.92	<0.0001

#### 4 结论

治理措施、土层深度、地貌类型及其交互作用对流域 SOC、TN、SM 的空间分布有显著影响 ( $P < 0.1$ )。同一地貌类型条件下, 与坡耕地相比, 水平梯田、林地措施、草地措施对 SOC 和 TN 影响显著 ( $P < 0.1$ )。与坡耕地相比较而言, 同一治理措施不仅提高了 SOC 和 TN 含量而且其含量在不同地貌类型间存在显著差异 ( $P < 0.1$ )。流域内水碳、水氮呈指数增加趋势。在地形复杂的黄土高原地区, 充分考虑地形与治理措施及其交互作用对 SOC 和 TN 的影响对准确预测或估算区域尺度 SOC 和 TN 变化具有重要意义。

#### References:

- [1] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget. *Environment International*, 2003, 29(4): 437-450.
- [2] Lal R. Global soil erosion by water and carbon dynamic // Lal R, Klmbkle J, Levine E, eds. *Soil and Global Change*. Boca Raton FL: Lewis Publishers, 1995: 131-134.
- [3] Lal R. Potential of desertification control to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. *Climatic Change*, 2001, 51(1): 35-72.

<http://www.ecologica.cn>

- [4] Lal R. World cropland soils as a source or sink for atmospheric carbon. *Advances in Agronomy*, 2001, 71: 145–191.
- [5] Zhu X M, Ren M E. Formation process of the Loess Plateau and a strategy of its management. *Journal of Chinese Historical Geography*, 1991, (4): 1–14.
- [6] Liu Q Q, Singh V P. Effect of microtopography, slope length and gradient, and vegetative cover on overland flow through simulation. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2004, 9(5): 375–382.
- [7] Rieke-Zapp D H, Nearing M A. Slope shape effects on erosion: a laboratory study. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(5): 1463–1471.
- [8] McNab W H. A topographic index to quantify the effect of mesoscale landform on site productivity. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere*, 1993, 23(6): 1100–1107.
- [9] Western A W, Zhou S L, Grayson R B, McMahon T A, Blösch G, Wilson D J. Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes. *Journal of Hydrology*, 2004, 286(1/4): 113–134.
- [10] Sebastià M T. Role of topography and soils in grassland structuring at the landscape and community scales. *Basic and Applied Ecology*, 2004, 5(4): 331–346.
- [11] Kobayashi Y, Koike F. Separating the effects of land-use history and topography on the distribution of woody plant populations in a traditional rural landscape in Japan. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 95(1/2): 34–45.
- [12] Yang G, Xue Z D, Lang Y M. A discussion on spatial arrangement of vegetation of artificial construction and the main construction techniques. *Research of Soil and Water Conservation*, 2000, 7(02): 136–139.
- [13] Basnet K. Controls of environmental factors on pattern of Montane rain forest in Puerto Rico. *Tropical Ecology*, 1993, 34(1): 51–65.
- [14] Wang H Q, Hall C A S, Cornell J D, Hall M H P. Spatial dependence and the relationship of soil organic carbon and soil moisture in the Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico. *Landscape Ecology*, 2002, 17(8): 671–684.
- [15] Powers J S. Changes in soil carbon and nitrogen after contrasting land-use transitions in northeastern Costa Rica. *Ecosystems*, 2004, 7(2): 134–146.
- [16] Chen H Q, Marhan S, Billen N, Stahr K. Soil organic-carbon and total nitrogen stocks as affected by different land uses in Baden-Württemberg (southwest Germany). *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2009, 172(1): 32–42.
- [17] Puget P, Lal R. Soil organic carbon and nitrogen in a Mollisol in central Ohio as affected by tillage and land use. *Soil and Tillage Research*, 2005, 80(1/2): 201–213.
- [18] Chen L D, Gong J, Fu B J, Huang Z L, Huang Y L, Gui L D. Effect of land use conversion on soil organic carbon sequestration in the loess hilly area, Loess Plateau of China. *Ecological Research*, 2007, 22(4): 641–648.
- [19] Ma Y H, Guo S L, Yang Y L, Wang X L, Yang G. Influence of vegetation types on soil organic C at Yangou catchment in the Loess hilly-gully region. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(1): 97–105.
- [20] Solomon D, Lehmann J, Zech W. Land use effects on soil organic matter properties of chromic luvisols in semi-arid northern Tanzania: carbon, nitrogen, lignin and carbohydrates. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2000, 78(3): 203–213.
- [21] Bi Y L, Wang B Q, Guo S L, Yu C Z. Characteristic of soil nutrients in dam system and its relation with erosive environment in the Loess Hilly Region I. The physicochemical properties and numerical analysis of dam system soil. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1997, 3(3): 1–9.
- [22] Yu C Z. The Comprehensive Treatment in Loess Plateau—the Investigated Report of Comprehensive Treatment in Zhuan Yao Gou Watershed in He Qu. *Geographical Institute of Loess Plateau, Shanxi University*, 1990.
- [23] French N R, Steinhilber R K, Swift D M. Grassland biomass trophic pyramids//French N R, ed. *Perspectives in Grassland Ecology*. New York, Springer-verlag, 1979: 59–87.
- [24] Shen S M. The effect of mineral nitrogen on the mineralization and immobilization of soil nitrogen. *Acta Pedologica Sinica*, 1986, 23(1): 10–16.
- [25] Wang X L, Guo S L, Ma Y H, Huan D Y, Wu J S. Effects of land use type on soil organic C and total N in a small watershed in Loess Hilly-gully Region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(6): 1281–1285.
- [26] Rovira P, Vallejo V R. Labile and recalcitrant pools of carbon and nitrogen in organic matter decomposing at different depths in soil: an acid hydrolysis approach. *Geoderma*, 2002, 107(1/2): 109–141.
- [27] Garcia-Pausas J, Casals P, Camarero L, Huguet C, Sebastià M T, Thompson R, Romanyà J. Soil organic carbon storage in mountain grasslands of the Pyrenees: effects of climate and topography. *Biogeochemistry*, 2007, 82(3): 279–289.
- [28] Barnes B V, Zak D R, Denton S R, Spurr S H. *Forest Ecology*, 4th ed. New York: Wiley, 1998.
- [29] Fu X L, Shao M A, Wei X R, Horton R. Soil organic carbon and total nitrogen as affected by vegetation types in Northern Loess Plateau of China. *Geoderma*, 2010, 155(1/2): 31–35.



- [30] Vesterdal L, Ritter E, Gundersen P. Change in soil organic carbon following afforestation of former arable land. *Forest Ecology and Management*, 2002, 169(1/2): 137-147.
- [31] Yang W Z, Yu C Z. *Thematic Maps of Comprehensive Government of Pilot Demonstration Area in Loess Plateau*. Beijing: Mapping Press, 1991.
- [32] Wei T X, Zhu J Z. Effects of slope length and grade on soil erosion in the gully regions in Loess Plateau. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, 24(1): 59-62.
- [33] O'Brien S L, Jastrow J D, Grimley D A, Gonzalez-Meler M A. Moisture and vegetation controls on decadal-scale accrual of soil organic carbon and total nitrogen in restored grasslands. *Global Change Biology*, 2010, 16(9): 2573-2588.
- [34] Tong C L, Xiao H A, Tang G Y, Wang H Q, Huang T P, Xia H A, Keith S J, Li Y, Liu S L, Wu J S. Long-term fertilizer effects on organic carbon and total nitrogen and coupling relationships of C and N in paddy soils in subtropical China. *Soil and Tillage Research*, 2009, 106(1): 8-14.
- [35] Truu M, Juhanson J, Truu J. Microbial biomass, activity and community composition in constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(13): 3958-3971.

#### 参考文献:

- [5] 朱显谟, 任美铎. 中国黄土高原的形成过程与整治对策. *中国历史地理论丛*, 1991, (4): 1-14.
- [12] 杨光, 薛智德, 梁一民. 陕北黄土丘陵区植被建设中的空间配置及其主要建造技术. *水土保持研究*, 2000, 7(2): 136-139.
- [19] 马玉红, 郭胜利, 杨雨林, 王小利, 杨光. 植被类型对黄土丘陵区流域土壤有机碳氮的影响. *自然资源学报*, 2007, 22(1): 97-105.
- [21] 毕银丽, 王百群, 郭胜利, 余存祖. 黄土丘陵区坝地系统土壤养分特征及其与侵蚀环境的关 I. 坝地土壤的理化性状及其数值分析, *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1997, 3(3): 1-9.
- [22] 余存祖. 黄土高原综合治理-河曲砖窑沟流域综合治理试验研究报告. 山西大学黄土高原地理研究所, 1990.
- [24] 沈善敏. 无机氮对土壤氮矿化与固定的影响——兼论土壤氮的“激发效应”. *土壤学报*, 1986, 23(1): 10-16.
- [25] 王小利, 郭胜利, 马玉红, 黄道友, 吴金水. 黄土丘陵区小流域土地利用对土壤有机碳和全氮的影响. *应用生态学报*, 2007, 18(6): 1281-1285.
- [31] 杨文治, 余存祖. *黄土高原综合治理试验示范区——专题地图集*. 北京: 测绘出版社, 1991.
- [32] 魏天兴, 朱金兆. 黄土残源沟壑区坡度和坡长对土壤侵蚀的影响分析. *北京林业大学学报*, 2002, 24(1): 59-62.