

# 坡向和坡位对小流域梯田土壤有机碳、氮变化的影响

南雅芳<sup>1</sup>, 郭胜利<sup>1, 2\*</sup>, 张彦军<sup>1</sup>, 李俊超<sup>1</sup>, 周小刚<sup>1, 2</sup>, 李泽<sup>1</sup>, 张芳<sup>1</sup>, 邹俊亮<sup>1</sup>

(1 西北农林科技大学 资源与环境学院 陕西杨凌 712100; 2 中国科学院水利部 水土保持研究所 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 坡向和坡位是影响土壤有机碳(SOC)和全氮(TN)变化的两大重要地形因素。研究其对小流域梯田SOC和TN变化的影响,对预测黄土高原地区坡改梯条件下土壤碳汇变化具有重要意义。本文以黄土丘陵沟壑区一高泉沟小流域为例,区分东、西两种坡向,再根据海拔区分上(2220~2326 m)、中(2130~2220 m)、下(1938~2130 m)三种坡位,共采集213个土壤样品,研究坡向、坡位对梯田耕层(0~20 cm)SOC和TN的影响。结果表明,西向坡SOC和TN含量分别比东向坡高22.8%和13.6%( $P < 0.1$ )。东西向坡的中、下坡位SOC和TN含量均大于上坡位。在西向坡,SOC含量下坡位(8.78 g/kg)最高,中坡位(7.82 g/kg)次之,上坡位(7.46 g/kg)最低;与上坡位相比,中坡位和下坡位的TN含量提高了12.1%、24.2%。在东向坡,SOC含量中坡位(7.15 g/kg)最高,下坡位(6.28 g/kg)次之,上坡位(5.37 g/kg)最低;与上坡位相比,中坡位和下坡位的TN含量提高了37.3%和29.4%。坡向与坡位的交互作用对流域SOC的空间分布影响显著( $P < 0.1$ )。坡向、坡位对土壤碳氮比值(C/N)也有显著影响( $P < 0.1$ )。这一结果对准确估算流域梯田SOC和TN的变化提供了参考。

**关键词:** 坡向; 坡位; 梯田; 土壤有机碳; 全氮

中图分类号: S153.6<sup>+</sup>2

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2012)03-0595-07

## Effects of slope aspect and position on soil organic carbon and nitrogen of terraces in small watershed

NAN Ya-fang<sup>1</sup>, GUO Sheng-li<sup>1, 2\*</sup>, ZHANG Yan-jun<sup>1</sup>, LI Jun-chao<sup>1</sup>, ZHOU Xiao-gang<sup>1, 2</sup>, LI Ze<sup>1</sup>, ZHANG Fang<sup>1</sup>, ZOU Jun-liang<sup>1</sup>

(1 College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Slope aspect and position are two important factors which affect the changes of soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN). It is important for studying the influences of two terrain factors on the SOC and TN and forecasting the changes of carbon sink in watersheds of the Loess Plateau. Based on two slope aspects (west-facing slope and east-facing slope) and three slope positions (upper slope, mid slope and lower slope), 213 soil surface samples were collected to investigate effect of slope aspects and positions on SOC and TN (0–20 cm) in terraces at a typical watershed of Gaoquangou in hilly regions of the Loess Plateau. SOC and TN in the 0–20 cm soil layer on the west-facing slopes are improved by 22.8% and 13.6% compared with those of the east-facing slopes ( $P < 0.1$ ). In the same slope aspect or slope positions, SOC and TN in the 0–20 cm soil layer in the mid slopes and lower slopes are higher than those of the upper slopes. In the west-facing slopes, the contents of SOC in the lower slopes (8.78 g/kg) are the highest, followed by the mid slopes (7.82 g/kg), and the contents of SOC in the upper slopes (7.46 g/kg) are the lowest. Compared with the upper slopes, the contents of TN are increased by 12.1% in the mid slopes ( $P > 0.1$ ) and increased by 24.2% in the lower slopes ( $P < 0.1$ ). In the east-facing slopes, the contents of SOC in the mid slopes (7.15 g/kg) are the highest, followed by the lower slopes (6.28

收稿日期: 2011-09-26 接受日期: 2011-12-13

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项—应对气候变化的碳收支认证及相关问题(XDA05050504)资助。

作者简介: 南雅芳(1987—)女,山西吕梁人,硕士研究生,主要从事土壤生态研究。E-mail: nanyafang@126.com

\* 通讯作者 E-mail: slguo@ms.iswc.ac.cn

g/kg), and the contents of SOC in the upper slopes (5.37 g/kg) are the lowest. Compared with the upper slopes, the contents of TN are increased by 37.3% in the mid slopes ( $P < 0.1$ ) and increased by 29.4% in the lower slopes ( $P < 0.1$ ). The interaction of slope aspect and position affects spatial distribution of SOC in the watershed significantly ( $P < 0.1$ ). Slope aspect and position have significant influences on soil C/N ratio ( $P < 0.1$ ). These results are useful for accurately estimating the changes of SOC and TN in terraces of the small watersheds.

**Key words:** slope aspect; slope position; terrace; soil organic carbon; total nitrogen

坡改梯不仅是治理水土流失的重要措施,也是降低土壤碳库流失,提高陆地生态系统碳汇能力的重要途径之一<sup>[1-2]</sup>。在全国范围内,坡耕地的水土流失面积占耕地总面积的 34.3%<sup>[1]</sup>。在黄土高原,坡耕地面积占耕地面积的 43.0%~73.6%<sup>[3-5]</sup>,其侵蚀模数可高达 10000~30000 t/(km<sup>2</sup>·a);在丘陵沟壑区,坡耕地水土流失量约占总流失量的 50%~70%<sup>[5]</sup>。坡耕地土壤遭受侵蚀后,随着作物产量降低(最高达 35%),土壤有机碳(SOC)降低幅度最高达 60%以上<sup>[6]</sup>。大规模的梯田建设将是影响区域土壤有机碳、氮储量的重要影响因素。因此,了解流域尺度梯田土壤有机碳、氮的变化及其影响机理对预测区域陆地土壤碳汇变化具有重要意义。

流域内,坡向、坡位对土壤的理化性质、作物产量、土地生产力、土壤水分状况都有影响<sup>[7-10]</sup>。坡向和坡位也是影响土壤有机质空间分布及其腐殖化和矿化过程的重要因素<sup>[11]</sup>。同一坡位不同坡向上,北向坡或阴坡 SOC 要比南向坡或阳坡高<sup>[12-13]</sup>;同一坡向下坡位 SOC 比上坡位高<sup>[9,14-15]</sup>,也有研究发现,上坡位由于凋落物分解速率低等原因其 SOC 含量要高于下坡位<sup>[7,16]</sup>,但上述大量研究主要集中在林地和草地上。在农田生态系统中,坡位和坡向对土壤理化性状的影响方面的研究相对较少。Li 和 Lindstrom<sup>[15]</sup>在黄土高原丘陵沟壑区的研究结果表明,坡耕地和梯田 SOC 和土壤全氮(TN)都呈现下坡位 > 中坡位 > 上坡位的趋势;Zhang 等<sup>[17]</sup>在四川省的研究发现,坡耕地上水力和耕作侵蚀引起土壤迁移及其 SOC 分布的变化。关于坡向及其坡向与坡位相互作用条件下流域内水平梯田土壤有机碳、氮的变化研究较少。

流域内,梯田土壤物理性状、肥力状况等具有显著的空间差异<sup>[18]</sup>,但坡向和坡位对梯田 SOC 分布的影响及其机理尚不清楚。研究坡向和坡位及其相互作用对小流域梯田 SOC、TN 变化的影响对深入了解流域 SOC 和 TN 的空间变异性有重要意义,也可

为准确估算流域土壤有机碳储量的变化提供基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

高泉沟流域(35°22′~35°25′N,104°31′52″~104°34′1″E)是典型的黄土丘陵沟壑区,位于甘肃省定西市团结乡,属黄河流域祖厉河水系关川河的一级支流,水土保持区划属黄土丘陵沟壑区第 V 副区。流域面积 9.168 km<sup>2</sup>,海拔 1800~2400 m,南高北低,相对高差多为 100~300 m。流域被两条一级主沟道切割,形成“两沟一梁四面坡”的地貌特征,其中 I 号沟长 6.83 km,流向自南向北,II 号沟长 3.40 km,流向自西南向北,两沟交汇于流域出口处。流域主沟横剖面一般呈矩形宽浅槽式,为“U”型谷,流域总分支比为 5.81。流域属中温带半干旱气候,年降水量 415 mm,降水量少而集中,7~9 月降水占全年总降水量的 60%~70%,干旱频率为 40%~70%。该区日照充足,年均气温 6.2℃,年均≥10℃活动积温 2075℃,太阳辐射量 5858 MJ/m<sup>2</sup>,生育期辐射量 3832 MJ/m<sup>2</sup>,年日照时数 2500 h,无霜期 140 d,蒸发量 1318 mm。

流域内梁峁地、谷坡地和谷底地分别占流域总面积的 64.7%、19.0%和 13.8%。沟壑密度 3.14 km/km<sup>2</sup>,流域内土壤以黄麻土类为主占 75%。有机质含量在 10 g/kg 以下,速效磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)含量 1.3~2.9 mg/kg(属极缺水平),速效氮含量 30~60 mg/kg,属国家四级以下贫瘠土壤。流域治理前土壤侵蚀模数 6120 t/(km<sup>2</sup>·a)。试区 95%的农耕地土层厚度 2~10 m。据测定,农田 20 cm 土层密度 2.64~2.69 g/cm<sup>3</sup>,容重 1.12~1.39 g/cm<sup>3</sup>,孔隙度 48.5%~57.3%,pH 值为 7.5~8.6。该流域梯田建设始于 1958 年,1983 年梯田建设走上正轨化、规范化道路,小于 20°的坡耕地全部修造水平梯田,1995 年该流域耕地面积 3231.3 hm<sup>2</sup>,水平梯田 1652

hm<sup>2</sup>, 占 48.6%。目前, 基本实现了梯田化<sup>[19]</sup>。

该试区农作物主要有小麦 (*Triticum aestivum* Linn)、玉米 (*Zea mays* L.)、谷子 (*Setaria italica*)、胡麻 (*Sesamum indicum*)、马铃薯 (*Solanum tuberosum*) 等。农作物一年一熟, 其种植结构为“粮、经、饲”三元型结构, 粮食作物中夏、秋作物比为 5:5, 在前茬作物收获后, 早耕、深耕, 遇雨耕地破板结保墒, 结合冻前耕地施入农肥、磷肥和铵类氮肥, 早春避免或减少翻耕, 随耕即耙。林地有小杨树 (*Populus simonii* Carr.) 林、沙棘 (*Hippophae rhamnoides*) 林等。草地分为天然草地和人工草地, 人工草地是以紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 为主, 其覆盖度为 39.41%, 天然草地以禾本科和菊科为主, 也有针茅 (*Stipa capillata* Linn.)、蒿属 (*Artemisia* L.) 植物等。

## 1.2 研究方法

1.2.1 流域内样点的设置 依据坡向和坡位两大因素对流域内的梯田进行类似“分层采样”的方法采

集土壤样品。因本流域主沟为南北走向, 坡向分为东向坡和西向坡, 坡位区分为上、中、下三种, 将海拔 2220~2326 m 划为上坡位, 2130~2220 m 划为中坡位, 1938~2130 m 划为下坡位。2010 年 10 月进行为期 2 天的采样。采样时利用 GPS 进行定位, 并记录每个采样点的海拔、经纬度、土地利用方式、坡向、采样深度等采样信息。在流域尺度上随机采样, 对同一坡向相同坡位相同类型的样点, 依据流域实际情况在其上、中、下游都进行采样, 采样区域最小面积 >50 m<sup>2</sup>。采集 0—20 cm 土壤样点 67 个, 每个采样点 3~5 次重复, 共计 213 个土壤样品 (具体情况见表 1)。采样土钻直径为 3 cm。

1.2.2 土壤样品的分析 新鲜样品混合均匀后在室内进行自然风干, 风干样品过 0.25 mm 筛后, 测定土壤有机碳 (SOC) 和全氮 (TN) 含量, 土壤有机碳用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 外加热法, 全氮用凯氏定氮法 (自动定氮仪 BUCHI322/343) 测定。

表 1 黄土丘陵区高泉沟流域内水平梯田样品采集数及比例

Table 1 Sample size and proportion in Gaoquangou watershed of hilly regions of the Loess Plateau

坡向 Aspect	坡位 Slop position	采样点数 (n) Number of sampling points	样点百分比 (%) Percentage of sampling points
西向坡 West-facing slopes	上坡位 Upper slope	5	7.5
	中坡位 Mid slope	12	17.9
东向坡 East-facing slope	下坡位 Lower slope	11	16.4
	上坡位 Upper slope	4	6.0
	中坡位 Mid slope	16	23.9
	下坡位 Lower slope	19	28.3
总计 Total		67	100

## 1.3 数据处理及统计分析

利用 Excel 软件进行数据的预处理, 用 SAS 软件的 UNIVARIATE plot normal 程序包对数据进行正态分布检验。并用 SAS 软件对同一坡位不同坡向和同一坡向不同坡位上的 SOC、TN 和 C/N 进行方差分析 (GLM), 当 F 检验显著时再进行两个坡向 (西向坡、东向坡) 和 3 种坡位 (上坡位、中坡位、下坡位) 均值间的 (Duncan) 检验, 对同一坡位不同坡向以及同一坡向下不同坡位进行方差分析 (GLM), 当 F 检验显著时, 进行均值间的 (Duncan) 检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 流域梯田有机碳、全氮和碳氮比变化特征

由表 2 可知, 流域内表层 SOC 含量的变化范围为 1.53~13.06 g/kg, 均值为 7.20 g/kg, 近似正态分布 (W = 0.9781), TN 含量的变化范围为 0.28~1.22 g/kg, 均值为 0.70 g/kg, 近似正态分布 (W = 0.9837), C/N 的变化范围为 5.47~13.36, 均值为 10.26, 近似正态分布 (W = 0.9721)。

坡向、坡位对流域土壤 SOC 和 TN 以及土壤 C/N 的空间分布有显著 (P < 0.1) 影响 (表 3)。坡向

表 2 黄土丘陵区高泉沟流域表层(0—20 cm)有机碳、全氮和碳氮比的正态分布检验

Table 2 Normal distribution test of SOC, TN and soil C/N ratio in topsoil (0–20 cm) in Gaoquangou watershed of hilly regions of the Loess Plateau

项目 Item	均值 Mean (g/kg)	最大值 Max (g/kg)	最小值 Min (g/kg)	标准差 SD (g/kg)	变异系数 CV (%)	极差 Range (g/kg)	W 值 W value
SOC	7.20	13.06	1.53	2.55	35.41	11.53	0.9781
TN	0.70	1.22	0.28	0.22	31.86	0.94	0.9837
C/N	10.26	13.36	5.47	1.42	13.82	7.89	0.9721

注( Note): SOC—土壤有机碳 Soil organic carbon; TN—全氮 Total nitrogen.  $n=213$ , SD—Standard deviation; CV—Coefficient variation.

表 3 黄土丘陵区高泉沟流域有机碳、全氮和碳氮比的空间分布影响因子方差分析

Table 3 ANOVA analysis of spatial distribution of SOC, TN and soil C/N ratio in Gaoquangou watershed of hilly regions of the Loess Plateau

项目 Item	df	有机碳 SOC				全氮 TN				碳氮比 C/N ratio			
		SS	MS	F	Pr > F	SS	MS	F	Pr > F	SS	MS	F	Pr > F
A	1	123.11	123.11	19.82	<0.0001	0.56	0.56	11.59	0.0008	22.96	22.96	11.09	0.0010
P	2	31.37	15.69	2.53	0.0825	0.58	0.29	5.99	0.0030	23.82	11.91	5.75	0.0037
A × P	2	36.96	18.48	2.97	0.0532	0.19	0.10	1.97	0.1414	7.75	3.87	1.87	0.1566

注( Note): SOC—Soil organic carbon; TN—Total nitrogen; A—坡向 Aspect; P—坡位 Slope position; df—自由度 Degree of freedom; SS—平方和 Sum of squares; MS—均方 Mean square.

与坡位的交互作用对流域土壤 SOC 的空间分布影响显著( $P < 0.1$ ) ,但坡向与坡位的交互作用对流域土壤 TN 及土壤 C/N 的空间分布影响不显著( $P > 0.1$ )。

## 2.2 坡向对流域 SOC 和 TN 的影响

坡向对梯田 SOC 和 TN 都有显著( $P < 0.1$ )影响(表 3)。在同一坡位的不同坡向上进行方差分析 SOC 和 TN 含量差异显著。与东向坡上、中、下 3 个坡位相比,西向坡上坡位 SOC(7.46 g/kg)含量提高了 38.9%,TN(0.66 g/kg)含量提高了 29.4%;西向坡中坡位 SOC(7.82 g/kg)含量和 TN(0.74 g/kg)含量提高的幅度不大,分别为 9.4%和 5.7%;西向坡下坡位 SOC(8.78 g/kg)含量提高了 39.8%,TN(0.83 g/kg)含量提高了 25.8%。

## 2.3 坡位对流域 SOC 和 TN 的影响

同一坡向上,SOC 和 TN 因坡位而存在显著差异(表 4)。同一坡向不同坡位上,在西向坡,与上坡位相比,中坡位 SOC(7.82 g/kg)含量提高了 4.8%,但差异不显著( $P > 0.1$ ),下坡位 SOC(8.78 g/kg)含量提高了 17.7%( $P < 0.1$ );中坡位 TN(0.74 g/kg)含量提高了 12.1%( $P > 0.1$ ),下坡位 TN(0.82 g/kg)含量提高了 24.2%( $P < 0.1$ )。在东向坡,与上坡位相比,中坡位 SOC(7.15 g/kg)含量提

高了 33.2%( $P < 0.1$ ),下坡位 SOC(6.28 g/kg)含量提高了 17.0%( $P > 0.1$ );中坡位 TN(0.70 g/kg)含量提高了 37.3%( $P < 0.1$ ),下坡位 TN(0.66 g/kg)含量提高了 29.4%( $P < 0.1$ )。上述结果表明,流域梯田在不同坡位上,SOC 和 TN 含量均呈现中、下坡位 > 上坡位的趋势。

## 2.4 流域梯田 C/N 变化及其特征

在同一坡位不同坡向上进行方差分析,土壤 C/N 差异显著( $P < 0.1$ )。与东向坡相比,在上坡位,西向坡 C/N(11.29)提高 4.8%,差异不显著( $P > 0.1$ );在中坡位上,西向坡(10.58)提高 4.6%( $P < 0.1$ );在下坡位,西向坡(10.65)提高 13.7%( $P < 0.1$ )。

在同一坡向不同坡位上,土壤 C/N 差异显著( $P < 0.1$ )(表 4)。与上坡位相比,在西向坡,中坡位 C/N(10.58)减少了 6.3%( $P < 0.1$ ),下坡位 C/N(10.65)减少了 5.7%( $P < 0.1$ );在东向坡上,中坡位 C/N(10.12)减少了 6.0%,差异不显著( $P > 0.1$ ),下坡位 C/N(9.37)减少了 13.0%( $P < 0.1$ )。

上述结果表明,流域内梯田同一坡位不同坡向上,C/N 呈现西向坡 > 东向坡的趋势;流域内梯田同一坡向不同坡位上,C/N 呈现上坡位 > 中下坡位的趋势。

表 4 黄土丘陵区高泉沟流域梯田坡位对 SOC、TN 和 C/N 的影响

Table 4 Effects of slope aspect and position on SOC, TN and soil C/N ratio in Gaoquangou watershed of hilly regions of the Loess Plateau

坡向 Aspect	坡位 Slop position	样本数( <i>n</i> ) No. of samples	有机碳 SOC ( g/kg)	全氮 TN ( g/kg)	碳氮比 C/N ratios
西向坡	上坡位 Upper slope	22	7.46 ± 0.31 b	0.66 ± 0.03 b	11.29 ± 0.19 a
West-facing slopes	中坡位 Mid slope	34	7.82 ± 0.49 ab	0.74 ± 0.04 ab	10.58 ± 0.18 b
	下坡位 Lower slope	33	8.78 ± 0.47 a	0.82 ± 0.04 a	10.65 ± 0.15 b
东向坡	上坡位 Upper slope	12	5.37 ± 0.73 b	0.51 ± 0.07 b	10.77 ± 0.61 a
East-facing slope	中坡位 Mid slope	55	7.15 ± 0.37 a	0.70 ± 0.03 a	10.12 ± 0.16 ab
	下坡位 Lower slope	57	6.28 ± 0.29 ab	0.66 ± 0.03 a	9.37 ± 0.27 b

注( Note): SOC—Soil organic carbon; TN—Total nitrogen. 数值后不同字母表示不同坡位差异达 90% 显著水平 Values followed by different letters are significantly different at the 90% level.

### 3 讨论

流域内水平梯田, SOC 和 TN 含量因坡向存在显著差异。这一现象可能与不同坡向上生物量和水热差异密切相关。坡向通过影响作物的生物量进而影响有机质的输入量, 如有研究发现, 西向坡牧草产量比东向坡高 16.3%<sup>[8]</sup>; 在林地上, 在上坡位, 西向坡单株生物量比东向坡高 20.0%, 在下坡位, 西向坡单株生物量比东向坡高 65.6%<sup>[20]</sup>。此外, 在不同坡向上, 地面接受太阳辐射量不同, 从而导致地面温度与土壤蒸发量不同<sup>[21]</sup>, 水分状况的差异影响有机质的分解和微生物碳的矿化<sup>[22-23]</sup>。东向坡光照条件好, 蒸发量较大, 土壤含水量低, 土温较高<sup>[14]</sup>, 土壤中的有机物质分解速度加快<sup>[24]</sup>。东西坡的水热条件差异致使有机物质的积累和分解呈现差异, 长期作用条件下导致了不同坡向上 SOC 和 TN 积累的差异。

不同坡位上 SOC 和 TN 的差异可能与以下几方面的原因有关, 1) 梯田修筑之前, 由于土壤侵蚀, 上坡位的表土向下搬运、迁移, 致使下坡位 SOC 含量较高<sup>[25]</sup>。Lal 和 Wairiu<sup>[26]</sup> 在索罗门群岛的研究发现, 天然森林土条件下, 上坡位部分土壤迁移到下部, 造成了 0—15 cm 土层的 SOC 含量呈现下坡位 > 中坡位 > 上坡位的趋势, 且差异显著, 但深层土壤 SOC 高低差异就不显著。Zhang 等<sup>[17]</sup> 研究发现, 与上坡位相比, 中坡位和下坡位的 SOC 分别提高了 9.5%、49.5%, 中坡位和下坡位的 TN 含量则相应提高了 20.0%、70.0%。梯田在修筑时, 上坡位的

表土会堆积到下部, 使其 SOC 含量低, 的下土层裸露, 而中、下坡位的表土 SOC 和 TN 含量高于上坡位。如机修梯田采用表土逐台下移法, 活土还原, 可修筑大面积、高质量的梯田<sup>[19]</sup>。2) 耕作侵蚀影响着梯田土壤迁移<sup>[27]</sup> 和土壤质量<sup>[15]</sup>。如 Zhang 等<sup>[17]</sup> 研究发现, 梯田中耕作侵蚀率是坡地的 1.45 倍, 梯田耕作侵蚀占总侵蚀率的 83%; Li 和 Lindstrom<sup>[15]</sup> 研究发现, 耕作侵蚀通过梯田间的距离及其坡度对梯田土壤质量影响较大, 进而影响到了梯田 SOC 等养分的空间分布, 本文研究的是水平梯田, 耕作侵蚀对其影响可能不如对坡式梯田的影响大。3) 不同坡位上, 土壤含水量不同。坡顶的潜在蒸散量大于坡腰, 坡底最小<sup>[28]</sup>。上坡位接受光照多, 通风好<sup>[9]</sup>, 水分蒸发量大, 土壤水分含量较低, 有利于有机质分解<sup>[14, 22]</sup>, SOC 和 TN 含量低; 中、下坡位恰好相反, SOC 和 TN 含量较高。4) 流域内, 居民点位于坡底, 对中、下部梯田的管理措施( 如施肥、水分管理、翻耕、清除杂草等) 有可能优于上坡位, 导致中、下部的表土 SOC 和 TN 含量高于上坡位。Hairsto 和 Grigal<sup>[29]</sup> 在美国明尼苏达州 Marcell 实验林场研究发现, 在冰川沉积平原, 同一坡向上 SOM 呈现下坡位 > 中坡位 > 上坡位的趋势, 与上坡位相比, 中坡位和下坡位分别提高了 13.2%、58.4%, 同一坡向上 TN 也呈现下坡位 > 中坡位 > 上坡位的趋势, 与上坡位相比, 中坡位和下坡位分别提高了 23.7%、40.5%。在草地生态系统中, 由于下坡位放牧强度要高于中坡位和上坡位, 不同坡位上归还的生物量有差异, 造成了下坡位 SOC 含量低于中坡位和上坡

位。Sigua 和 Coleman<sup>[16]</sup>在克斯维尔北部的亚热带农业研究站研究坡向和坡位对草地 SOC 空间分配的影响时发现,在同一坡向不同坡位上,与下坡位相比,上坡位和中坡位 SOC 含量分别提高了 42.4%、26.3%。

梯田不同坡向或坡位上土壤 C/N 差异有可能与下列因素有关: 1) SOC 和 TN 积累速度不同步,从而致使 C/N 变化规律与 SOC 和 TN 不同。已有研究发现,即使在同一植被条件下,因 SOC 积累快于 TN,致使土壤 C/N 随时间呈升高趋势<sup>[30]</sup>; 2) 微生物是影响土壤有机碳、氮变化的重要影响因素<sup>[31-32]</sup>,不同坡向或坡位上土壤微生物群落结构存在差异<sup>[33]</sup>,因此,流域内不同坡向或坡位上土壤 C/N 的差异可能与土壤微生物种类、数量、活性有关<sup>[34]</sup>。

黄土高原地区坡耕地共 1300 万  $\text{hm}^2$ ,自解放以来到本世纪初,黄土高原地区梯田建设面积已达到了 400 万  $\text{hm}^2$ <sup>[35]</sup>。在水土流失严重的丘陵沟壑区,几乎整个流域都建成了水平梯田。例如,甘肃省庄浪县已经基本“梯田化”。根据《全国坡耕地水土流失综合治理规划》,今后 10 年内国家将对 1 亿亩坡耕地实施梯田改造。黄土区大规模的梯田建设将是影响区域陆地生态系统碳储量的重要因素。本研究中,坡向和坡位对小流域梯田有机碳、氮变化影响的研究结果对准确估算黄土区梯田生态系统中 SOC 储量的变化提供了参考指标。

## 4 结论

1) 流域内水平梯田,坡向和坡位对 SOC 有显著影响。在同一坡位的不同坡向上,与东向坡上、中、下 3 个坡位相比,西向坡上坡位 SOC 含量提高了 38.9%,中坡位 SOC 含量提高了 9.4%,下坡位 SOC 含量提高了 39.8%。在同一坡向不同坡位上,与上坡位相比,西向坡上,中坡位 SOC 含量提高了 4.8%,下坡位提高了 17.7%;东向坡和西向坡的规律基本一致。坡向和坡位对 TN 含量的影响规律与 SOC 基本一致。坡向与坡位的交互作用对流域 SOC 的空间分布影响显著 ( $P < 0.1$ )。

2) 流域内梯田不同坡向上,C/N 呈现西向坡 > 东向坡的趋势;梯田同一坡向不同坡位上,C/N 呈现上坡位 > 中、下坡位的趋势。在同一坡位的不同坡向上,与东向坡上、中、下 3 个坡位相比,西向坡上

坡位 C/N 提高了 4.8%,中坡位 C/N 提高了 4.6%,下坡位 C/N 提高了 13.7%。在同一坡向不同坡位上,在西向坡,与上坡位相比,中坡位和下坡位的 C/N 分别减少了 6.3%、5.7%;东向坡上有着类似的规律。

## 参考文献:

- [1] 唐克丽 等. 中国水土保持[M]. 北京: 科学出版社,2004.  
Tang K L *et al.* Soil and water conservation in China [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [2] 水利部,中国科学院,中国工程院. 中国水土流失防治与生态安全(北方农牧交错区卷)[M]. 北京: 科学出版社, 2010. 194-201.  
Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Chinese Academy of Engineering. Chinese soil erosion control and ecological safety (The north farming-pastoral areas volume) [M]. Beijing: Science Press, 2010. 194-201.
- [3] 杨文治,余存祖. 黄土高原区域治理与评价[M]. 北京: 科学出版社,1992.  
Yang W Z, Yu C Z. Governance and evaluation of the Loess Plateau region [M]. Beijing: Science Press, 1992.
- [4] 郭廷辅. 水土保持的发展与展望[M]. 北京: 中国水利水电出版社,1997. 58-59.  
Guo T F. The development of the soil and water conservation and prospect [M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 1997. 58-59.
- [5] 黄少燕,查轩. 坡耕地侵蚀过程与土壤理化特性演变[J]. 山地学报,2002,20(3): 290-295.  
Huang S Y, Zha X. Study on soil erosion process and evolution of soil physicochemistry characteristics on sloping farmland [J]. Mount. Sci., 2002, 20(3): 290-295.
- [6] Olson K R, Mokma D L, Lal R, Schumacher T E. Erosion impacts on crop yield for selected soils of the north central United States [A]. Lal R. Soil quality and soil erosion [C]. London: CRC Press, 1999. 259-284.
- [7] Chen Z S, Tsui C C, Hsieh C F. Relationships between soil properties and slope position in a lowland rain forest of southern Taiwan [J]. Geoderma, 2004, 123(1-2): 131-142.
- [8] Sigua G C, Coleman S W, Albano J, Williams M. Spatial distribution of soil phosphorus and herbage mass in beef cattle pastures: effects of slope aspect and slope position [J]. Nutr. Cycl. Agroec., 2011, 89(1): 59-70.
- [9] McNab W H. A topographic index to quantify the effect of mesoscale landform on site productivity [J]. Can. J. For. Res., 1993, 23(6): 1100-1107.
- [10] Fu B J, Qiu Y, Wang J, Chen L D. Soil moisture variation in relation to topography and land use in a hillslope catchment of the Loess Plateau, China [J]. J. Hydrol., 2001, 240(3-4): 243-263.

- [11] Mulla D. Mapping and managing spatial patterns in soil fertility and crop yield [A]. Robet P C, Rust R H, Laron W E. Proceedings of soil specific crop management, Amer. Soc. Agron. [C]. Madison: Soil Science Society of America, 1993. 15-26.
- [12] Chen L D, Gong J, Fu B J, Wei W. Integrated effects of slope aspect and land use on soil nutrients in a small catchment in a hilly loess area, China [J]. Int. J. Sust. Dev. World, 2007, 14(3): 307-316.
- [13] Han X W, Tsunekawa A, Tsubo M, Li S Q. Effects of land-cover type and topography on soil organic carbon storage on Northern Loess Plateau, China [J]. Acta Agric. Scand. Sect. B - Soil Plant Sci., 2010, 60(4): 326-334.
- [14] Sariyildiz T, Anderson J M, Kucuk M. Effects of tree species and topography on soil chemistry, litter quality, and decomposition in Northeast Turkey [J]. Soil Biol. Biochem., 2005, 37(9): 1695-1706.
- [15] Li Y, Lindstrom M J. Evaluating soil quality-soil redistribution relationship on terraces and steep Hillslope [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2001, 65(5): 1500-1508.
- [16] Sigua G C, Coleman S W. Spatial distribution of soil carbon in pastures with cow-calf operation: effects of slope aspect and slope position [J]. J. Soils Sed., 2010, 10(2): 240-247.
- [17] Zhang J H, Quine T A, Ni S J, Ge F L. Stocks and dynamics of SOC in relation to soil redistribution by water and tillage erosion [J]. Glob Change Biol, 2006, 12(10): 1834-1841.
- [18] Dercon G, Deckers J, Govers G *et al.* Spatial variability in soil properties on slow-forming terraces in the Andes region of Ecuador [J]. Soil Till. Res., 2003, 72(1): 31-41.
- [19] 高世铭, 杨封科, 苏永生, 等. 陇中黄土丘陵沟壑区生态环境建设与农业可持续发展研究 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003.  
Gao S M, Yang F K, Su Y S *et al.* The research of ecological environment construction and sustainable development of agriculture in the Gansu Loess Plateau [M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2003.
- [20] 于顺龙. 坡向、坡位对水曲柳中龄林生长和生物量分配的影响 [J]. 内蒙古林业调查设计, 2009, 32(1): 54-56.  
Yu S L. Influence of aspect and position of slope on the growth and biomass allocation of mid-age fraxinus mandshurica [J]. Inner Mongolia For. Invest. Des., 2009, 32(1): 54-56.
- [21] 潘占兵, 余峰, 王占军, 等. 宁南黄土丘陵沟壑区坡向、坡位对苜蓿地土壤含水量时空变异的影响 [J]. 水土保持研究, 2010, 17(2): 141-144.  
Pan Z B, Yu F, Wang Z J *et al.* Effects of slope aspect and position on temporal and spatial variation of soil water content on alfalfa land in loess hilly region of south ningxia hui autonomous region [J]. Res. Soil Water Conserv., 2010, 17(2): 141-144.
- [22] Lamparter A, Bachmann J, Goebel M O, Woche S K. Carbon mineralization in soil: Impact of wetting-drying, aggregation and water repellency [J]. Geoderma, 2009, 150(3-4): 324-333.
- [23] Marschner B, Kalbitz K. Controls of bioavailability and biodegradability of dissolved organic matter in soils [J]. Geoderma, 2003, 113(3-4): 211-235.
- [24] Sidari M, Ronzello G, Vecchio G, Muscolo A. Influence of slope aspects on soil chemical and biochemical properties in a Pinus laricio forest ecosystem of Aspromonte (Southern Italy) [J]. Eur. J. Soil Biol., 2008, 44(4): 364-372.
- [25] Ritchie J C, McCarty G W, Venteris E R, Kaspar T C. Soil and soil organic carbon redistribution on the landscape [J]. Geomorphology, 2007, 89(1-2): 163-171.
- [26] Lal R, Wairiu M. Soil organic carbon in relation to cultivation and topsoil removal on sloping lands of Kolombangara, Solomon Islands [J]. Soil Till. Res., 2003, 70(1): 19-27.
- [27] Ni S J, Zhang J H. Variation of chemical properties as affected by soil erosion on hillslopes and terraces [J]. Eur. J. Soil Sci., 2007, 58(6): 1285-1292.
- [28] 何福红, 黄明斌, 党廷辉. 黄土高原沟壑区小流域土壤水分空间分布特征 [J]. 水土保持通报, 2002, 22(4): 6-9.  
He F H, Huang M B, Dang T H. Soil water distribution characteristics in wangdonggou watershed in gully region of Loess Plateau [J]. Bull. Soil Water Conserv., 2002, 22(4): 6-9.
- [29] Hairston A B, Grigal D F. Topographic variation in soil-water and nitrogen for 2 forested landforms in Minnesota, USA [J]. Geoderma, 1994, 64(1-2): 125-138.
- [30] O'Brien S L, Jastrow J D, Grimley D A, Gonzalez-Meler MA. Moisture and vegetation controls on decadal-scale accrual of soil organic carbon and total nitrogen in restored grasslands [J]. Glob Change Biol., 2010, 16(9): 2573-2588.
- [31] Hu J C, Liu L, Duan Z H *et al.* Effect of monospecific and mixed *Cunninghamia lanceolata* plantations on microbial community and two functional genes involved in nitrogen cycling [J]. Plant Soil, 2010, 327(1-2): 413-428.
- [32] Inubushi K, Acquaye S. Role of microbial biomass in biogeochemical processes in paddy soil environments [J]. Soil Sci. Plant Nutr., 2004, 50(6): 793-805.
- [33] Florinsky I V, McMahon S, Burton D L. Topographic control of soil microbial activity: a case study of denitrifiers [J]. Geoderma, 2004, 119(1-2): 33-53.
- [34] Robin C, Bazot S, Ullf L *et al.* Effects of elevated CO<sub>2</sub> concentration on rhizodeposition from *Lolium perenne* grown on soil exposed to 9 years of CO<sub>2</sub> enrichment [J]. Soil Biol. & Biochem., 2006, 38(4): 729-736.
- [35] 刘万铨. 水土保持是黄土高原改善生态环境保证农业可持续发展的必由之路 [J]. 中国水土保持, 1999, (4): 1-4.  
Liu W Q. Soil and water conservation is the only way to improve the ecological environment and ensure sustainable development of agriculture in the Loess Plateau [J]. Soil Water Conserv. China, 1999, (4): 1-4.