

滇池流域土壤养分分布及其对水体富营养化的影响

刘玉萍¹, 陈 西¹, 王延华^{1,2}, 杨 浩^{1,2}, 张明礼¹, 谢 标¹, 崔 骏¹

(1. 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210023)

(2. 江苏省物质循环与污染控制重点实验室, 江苏 南京 210023)

[摘要] 在滇池松华坝小流域(SHB)和上游小流域(SY)选取荒地、林地和草地3种土地利用方式,分别采集0~40 cm土壤样品。测定样品中总有机碳(TOC)、总氮(TN)和总磷(TP)含量,对比不同土地利用方式下土壤营养盐分布差异,并对流域内土壤营养盐负荷及其对水体富营养化的潜在影响进行评价。结果表明,①SHB小流域:TOC、TN和TP的含量均为草地最高,分别为16.88、1.77和0.42 mg/g;TOC含量:林地>荒地,TN和TP在林地和荒地中的含量差异不明显;②SY小流域不同土地利用方式下营养盐含量与SHB小流域呈现类似的特征:TOC、TN和TP的含量均为草地最高,荒地最低,其中TN和TP的含量3种土地利用方式下差异不显著;③对比土壤剖面,2个小流域表层土(0~20 cm)中营养盐含量明显高于20~40 cm层,SY小流域草地表层营养盐含量明显高于荒地;④2个小流域3种类型土壤均为TN重度污染,水体富营养化潜势高,表明控制小流域氮素输入是关键。荒地的OI和TP污染程度低于林地和草地,0~20 cm土壤3项污染指数都相对较高,具有较大的生态风险。

[关键词] 滇池,小流域,土壤养分,土地利用方式,生态风险

[中图分类号] X53 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2017)04-0129-08

Soil Nutrients Distribution in the Small Catchment and Their Effects on the Eutrophication of Dianchi Lake

Liu Yuping¹, Chen Xi¹, Wang Yanhua^{1,2}, Yang Hao^{1,2}, Zhang Mingli¹, Xie Biao¹, Cui Jun¹

(1. School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Materials Cycling and Pollution Control, Nanjing 210023, China)

Abstract: In this paper, three types of land uses including abandoned land, forestland and grassland in the Songhuaba catchment(SHB) and the Shangyou catchment(SY) of the Dianchi watershed were investigated to determine the effects of land use on soil nutrients. Contents of total nitrogen(TN), total phosphorus(TP) and total organic carbon(TOC) in the soil samples were measured to compare the differences between three types of land uses in two catchments. Nutrients pollution and the risk of eutrophication was in discussion as well. Results are as follows: (1) In the SHB catchment, the highest contents of TOC (16.88 mg/g), TN (1.77 mg/g) and TP (0.42 mg/g) were observed in the grassland. TOC content in the forestland was higher than that in the abandoned land. While the difference of TN and TP contents between the forestland and grassland was not obvious. (2) In the SY catchment, the similar distribution was found. The contents of TOC, TN and TP were highest in the grassland and lowest in the abandoned land. Not obvious difference of TN and TP contents in three types of land uses were observed. (3) Comparing the soil profile, TOC, TN and TP contents in the layer of 0-20 cm soil were much higher than those in the layer of 20-40 cm in both catchments. The TOC, TN and TP contents in the surface soil of the grassland is much higher than those in the abandoned land. (4) The TN standard index of three types of land uses was beyond the safe line, reflecting high eutrophication potential. The key measure will be the control of nitrogen inputs in the small catchment. OI and TP standard indexes in the abandoned land were lower than those in the forestland and grassland. Three standard indexes in the layer of 0-20 cm soil are relatively high, indicating ecological risks.

Key words: Dianchi lake, small catchment, nutrient, land use, ecological risk

收稿日期: 2017-01-13.

基金项目: 国家自然科学基金(41673107)、南京师范大学百人计划项目(184080H20181)、南京师范大学青蓝工程(184080H10330).

通讯联系人: 王延华, 教授, 研究方向: 流域生态环境演变. E-mail: wangyanhua@njnu.edu.cn

20 世纪七八十年代至今,随着我国工业与农业现代化进程的飞速推进,水体富营养化问题已成为经济发展中亟待解决的关键问题^[1-2]. 目前,流域内面源污染和水土流失是造成水体富营养化的主要因素^[3-5]. 不科学的土地利用方式将使水土流失加剧^[6],从而影响水体生态系统的自我调节功能,这在小流域尺度上影响更加显著^[7-8]. 近几十年来,人类的生产活动导致的土地利用变化对面源污染的影响逐渐受到重视^[9-12].

滇池流域地处云贵高原,是我国西南部经济发达地区之一. 自 1998 年云南实施退耕还林工程以来,极好地改善了流域内的生态环境. 据报道,近年来滇池每年平均入湖河流泥沙中所携带的氮素总量为 701 t,磷素总量为 564 t^[13]. 滇池北部小流域内的松华坝水库截盘龙江而建,上游水库位于果马河上游,两条河流均是主要的入滇河流. 因此研究滇池北部小流域土地利用方式对营养盐含量的影响有助于减弱、阻断滇池北部水土流失对湖体生态退化的贡献. 本研究对比 3 种不同的土地利用方式下的土壤中营养盐含量的差异与分布特征,据此推断土地利用方式对水土流失的影响;同时对流域内土壤营养盐负荷及其对水体富营养化的潜在影响进行评价,为研究小流域不同土地利用方式对于滇池流域水土流失与生态环境的影响提供参考依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

松华坝小流域(SHB)和上游小流域(SY)均位于滇池流域东北部(图 1),气候类型为北亚热带低纬高原山地季风气候. 两个流域内土壤类型主要有红壤、紫色土、石灰岩土、冲积土等. 目前植被大多数为次生的群落类型,林草地和荒地是其主要土地利用类型. SHB 小流域内主要河流有牧羊河及冷水河,两河汇交后注入松华坝水库,多年平均气温为 15.4 ℃,多年平均年降水量为 1 000 mm,有磷、盐、铁、煤、铝等矿藏. 上游水库因位于果马河上游而得名,流域内多年平均气温为 14 ℃,多年平均年降水量为 997 mm,有铁、煤、铝、铜、天然气等矿藏.

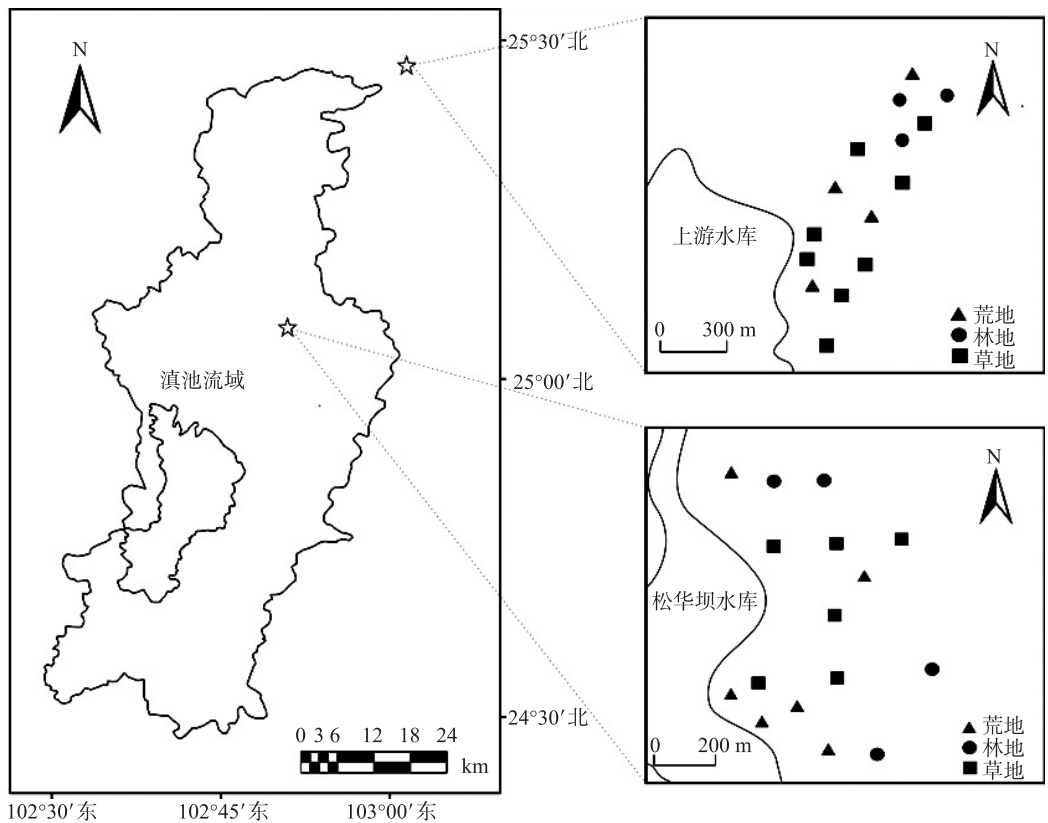


图 1 采样点分布
Fig. 1 Sampling locations

1.2 样品采集与处理

根据 SHB 小流域和 SY 小流域的总体特征及土地利用现状,将土地利用方式分为荒地、草地和林地 3 种。于 2011 年 7 月,在两个小流域内如图 1 所列共计 31 个样点进行土壤样品采集,其中在 SHB 小流域采集编号为 SHB-A 至 SHB-P 共 16 个样点的土样,在 SY 小流域采集编号为 SY-A 至 SY-O 共 15 个样点的土样。使用破碎锤($d=9\text{ cm}$, Atlas Copco, 美国)从地表垂直入土层取样,平行采样 3 次,每种土地利用方式下的采样深度均为 40 cm。样品中 SY-I 分为 40 层, SY-E、SHB-O 和 SHB-P 按深度平均分为 8 层(0~5、5~10、10~15、15~20、20~25、25~30、30~35、35~40 cm),其他采样点土样均分 2 层(0~20、20~40 cm)。

1.3 营养盐含量测定

对土壤样品的总有机碳(TOC)、总氮(TN)和总磷(TP)含量进行了测试。TOC 含量的测定采用总有机碳分析仪(TOC-LCSH, 岛津公司, 日本)和固体进样器(SSM-5000A, 岛津公司, 日本)联合分析土壤样品。称取 200 mg 过 0.074 mm 筛的风干土壤样品 2 份,将其中一份导入高温燃烧管中测定 TC 含量(TC 为总碳),另一份导入低温反应管中测定 IC 含量(IC 为无机碳酸盐),二者之差即为 TOC 含量^[14]。TN 和 TP 含量采用过硫酸盐消化法测定^[15]。每个土壤样品均重复测定 3 次,结果取其平均值。

1.4 污染评价方法和标准

目前国内外对土壤环境尚缺乏统一的方法和标准,考虑到滇池流域养分分布特点,参考以前所用的评价方法^[16-17],进行评价。

1.4.1 有机指数评价

有机指数通常用作土壤环境状况的指标,计算方法如下:

$$OI = \text{TOC}(\%) \times \text{TN}(\%) \times 0.95,$$

式中, OI 为有机指数;TOC 为土壤总有机碳含量实测值(%);TN 为土壤总氮含量实测值(%)。有机指数评价标准^[16]见表 1。

1.4.2 单因子指数评价

根据有关文献^[18],沉积物中具有最低级别生态效应的 TN 含量为 0.55 mg/g,具有严重级别生态效应的 TN 含量为 4.85 mg/g;沉积物中具有最低级别生态效应的 TP 含量为 0.60 mg/g,具有严重级别生态效应的 TP 含量为 2.00 mg/g。本研究采用 TN 的评价标准值为 0.55 mg/g,TP 的评价标准值为 0.60 mg/g。单一污染因子 i 的一般标准指数关系式如下:

$$S_i = C_i / C_s,$$

式中, S_i 为单项评价指数或标准指数; C_i 为评价因子 i 的实测值; C_s 为评价因子的评价标准值。单因子指数评价标准^[19]见表 2。

表 1 有机指数评价标准

Table 1 Evaluation standards of organic indexes

OI	类型	等级
$OI < 0.05$	清洁	I
$0.05 \leq OI < 0.2$	较清洁	II
$0.2 \leq OI < 0.5$	中度污染	III
$OI \geq 0.5$	重度污染	IV

表 2 单因子指数评价标准

Table 2 Evaluation standards of single factor index

S_i	类型	等级
$S_i < 0.5$	清洁	I
$0.5 \leq S_i < 1.0$	轻度污染	II
$1.0 \leq S_i < 1.5$	中度污染	III
$S_i \geq 1.5$	重度污染	IV

2 结果与讨论

2.1 土壤剖面 TOC、TN 和 TP 含量变化

碳、氮、磷是土壤中主要的养分元素,对促进植物生长起到十分关键的作用。以土壤 TOC 含量为 14.50 mg/g、TN 含量为 1.20 mg/g、TP 含量为 1.00 mg/g 作为土壤养分丰缺指标^[20]可以判断:SHB 小流域中林地与草地 TOC 含量较高,而荒地则明显低于指标,SY 小流域不同土地利用方式土壤的 TOC 含量均较低且相差不大。SHB 小流域土壤中林地的 TN 含量未达到丰缺指标,而 SY 小流域土壤 TN 含量普遍较高。SHB 和 SY 小流域土壤的 TP 含量均相对较低。

由表 3 可知,SHB 小流域 3 种土地利用方式下,0~40 cm 土壤 TOC 和 TP 含量的平均值表现为:草地(16.88 mg/g、0.42 mg/g)>林地(11.14 mg/g、0.25 mg/g)>荒地(7.08 mg/g、0.23 mg/g),TN 含量的平均值则表现为草地(1.77 mg/g)>荒地(1.28 mg/g)>林地(1.19 mg/g). SY 小流域 3 种土地利用方式下,0~40 cm 土壤 TOC 和 TN 含量的平均值表现为:草地(12.14 mg/g、1.93 mg/g)>林地(11.07 mg/g、1.90 mg/g)>荒地(7.43 mg/g、1.88 mg/g). 3 种土地利用类型土壤样品的 TP 含量平均值差异不大. 林地(0.43 mg/g)略低于草地与荒地(0.51 mg/g). SHB 小流域和 SY 小流域的 3 种类型的土壤中 TOC、TN、TP 含量以及 C/N、C/P 和 N/P 比值的最大值是最小值的几倍,可见各个采样点间营养元素含量的差异较大. 两个小流域不同土地利用类型土壤的营养元素的分布在 5%~50%之间,属于中低等程度变异. SHB 小流域 TOC、TN、TP 这 3 组数据变异系数相当,说明这 3 种营养元素的富集程度差距不大. 该小流域中草地与林地的营养元素变异系数小于荒地,分布较均匀,说明草地与林地受人类活动影响较小. SY 小流域 TP 的变异系数明显低于 TOC 和 TN,表示磷元素的分布在各类土壤中均比较均匀. 该流域不同土地利用类型土壤的营养元素变异系数呈现出非常明显的林地>草地>荒地的规律,这一情况说明该小流域林地的碳、氮、磷元素分布最为平均,草地次之,而荒地由于被荒置前受到人类不同程度生产生活活动的影响,导致营养元素的含量在不同地点差异较大.

影响土壤中 C/N、C/P、N/P 比值的因素有很多,地表径流、地下淋溶等自然因素影响的程度也不尽相同. SHB 小流域中,不同土地利用方式土壤 C/N 比为 2.66~12.71,C/P 比为 18.73~62.76,N/P 比为 2.54~8.41. C/P 和 N/P 比变化较大. 草地和林地的 C/N、C/P 比均明显高于荒地,而 N/P 比则呈现荒地>林地>草地的规律. SY 小流域中,不同土地利用方式土壤 C/N 比为 1.85~12.01,C/P 比为 5.35~34.70,N/P 比为 2.89~4.69,C/P 和 N/P 比的变异系数相对 C/N 比而言较小. 草地和林地的 C/N、C/P、N/P 比均明显高于荒地.

表 3 滇池小流域土壤营养盐含量统计特征
Table 3 Characteristics of nutrients contents in the small catchment of the Dianchi watershed

流域名称	土地利用方式		TOC/(mg/g)	TN/(mg/g)	TP/(mg/g)	C/N	C/P	N/P
SHB	荒地	变化范围	6.29~8.49	0.86~2.36	0.17~0.34	2.66~8.26	18.73~48.50	2.83~8.41
		平均值	7.08	1.28	0.23	6.24	34.21	5.75
		CV%	10.45	44.53	34.78	28.81	32.83	30.06
	林地	变化范围	8.83~14.06	0.89~1.46	0.15~0.38	8.74~10.04	23.35~62.76	2.54~6.53
		平均值	11.14	1.19	0.25	9.40	50.21	5.33
		CV%	20.56	26.05	32.00	5.13	31.38	30.48
	草地	变化范围	11.93~27.99	1.39~2.32	0.28~0.49	6.38~12.71	28.12~58.79	3.05~6.64
		平均值	16.88	1.77	0.42	9.48	40.73	4.42
		CV%	32.64	22.60	16.67	21.25	24.29	26.76
SY	荒地	变化范围	2.74~12.32	1.48~2.19	0.43~0.56	1.85~7.20	5.35~28.84	2.90~4.10
		平均值	7.43	1.88	0.51	3.95	15.32	3.73
		CV%	45.63	18.62	9.80	50.09	55.59	13.04
	林地	变化范围	9.25~13.22	1.79~2.00	0.43~0.50	4.61~7.38	21.66~26.23	3.55~4.69
		平均值	11.07	1.90	0.47	5.87	23.49	4.09
		CV%	14.81	5.79	6.38	19.49	8.41	11.48
	草地	变化范围	9.19~17.25	1.44~2.21	0.44~0.57	4.20~12.01	17.70~34.70	2.89~4.64
		平均值	12.14	1.93	0.51	6.60	24.09	3.86
		CV%	22.49	13.99	7.84	37.90	22.08	17.03

2.2 土地利用方式对土壤中营养盐分布特征的影响

由图 2、3 可见,各土地利用方式下,除 SHB 小流域 0~20 cm 土壤与 20~40 cm 土壤的 TP 含量相差不大之外,两个小流域的 3 种土地利用方式土壤样品中 0~20 cm 土壤的营养盐含量均明显高于 20~40 cm 土壤. SHB 和 SY 小流域中,3 种土地利用方式土壤样品 TOC 含量从 0~20 cm 层面到 20~40 cm 层面均明显下降,但降幅不一:SHB 小流域中,草地土壤由 14.58 mg/g 降至 9.71 mg/g,降幅为 33.40%;林地由 14.39 mg/g 降至 7.75 mg/g,降幅为 46.14%;荒地由 8.61 mg/g 降至 6.53 mg/g,降幅为 24.16%. SY 流域中,草地土壤由 18.85 mg/g 降至 14.92 mg/g,降幅为 20.85%;林地由 19.66 mg/g 降至 5.32 mg/g,降幅为 72.94%;荒地由 11.10 mg/g 降至 3.06 mg/g,降幅为 72.43%.

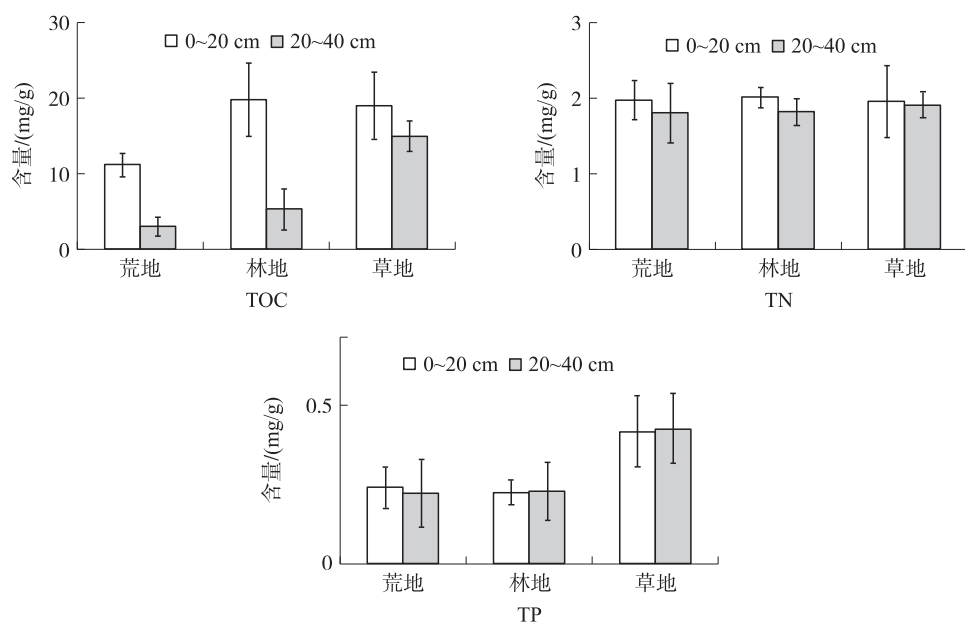


图2 SHB小流域营养盐分布情况

Fig. 2 Distribution of nutrients contents in the SHB catchment

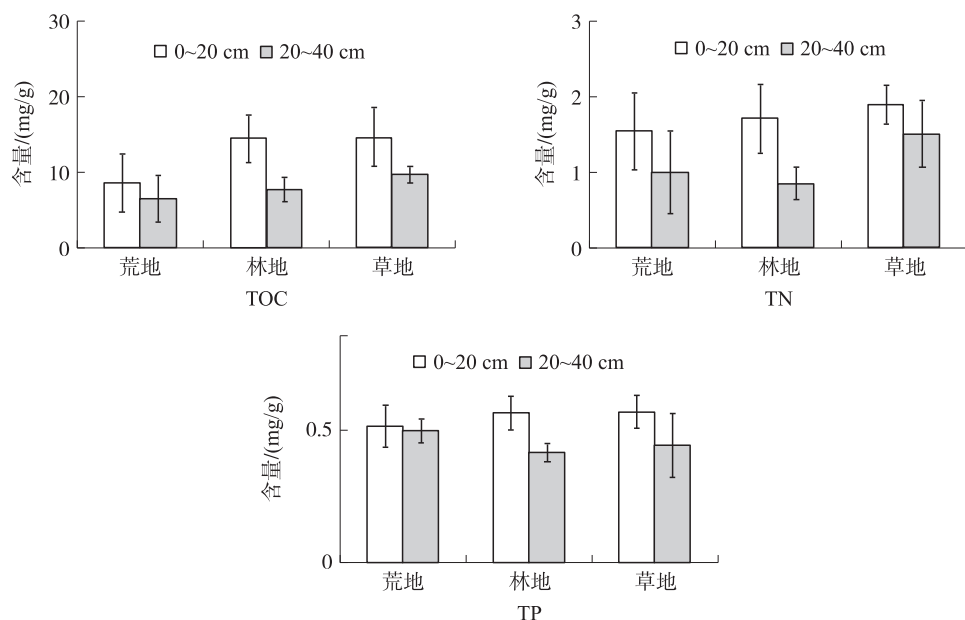


图3 SY小流域营养盐分布情况

Fig. 3 Distribution of nutrients contents in the SY catchment

由图2、3也可看出,SHB和SY小流域不同土地利用方式下0~20 cm土壤TOC含量和TN含量明显高于20~40 cm土壤,表明表层土壤更利于土壤有机碳和氮的储存^[21].这一特征在图4中表现得更加明显,SY小流域荒地土样(SY-C)与草地土样(SY-I)中0~10 cm土壤的TOC、TN、TP含量均远高于10~30 cm土壤,该差异主要是由植被覆盖、枯落物和根的作用及人类活动干扰所致^[22].且草地土样0~10 cm营养盐含量远高于荒地,这可能由于草本植被根系分布浅,土壤营养元素分布输入量上下差异明显造成的.在0~40 cm深度范围内,草地土壤TOC含量和TN含量最高,主要是因为草地土壤基饱和度较高、聚集能力强^[23];另外,草地土壤中良好的根系剖面分布与有机碳和氮的分布具有一致关系^[24].林地土壤由于枯枝落叶的分解输入也使其表层土壤中TOC和TN含量较高.荒地的TOC和TN含量较低,这是由于经历了一定时间的植被恢复,土壤中有机质被逐渐消耗,而外源新的有机物输入又相对较少^[25];这与地形的分异也存在一定关系^[26].综上,土地利用方式的改变会导致TOC和TN含量变化,意味着土壤肥力的改变,这与其他研究结果^[26-28]相一致.土壤中TP含量和分布与诸多因素有关,比如土壤母质、人类活动、施

肥情况、土地利用方式等^[8]. 磷在土壤中的停留时间较长,土壤侵蚀所致的磷流失将在湖泊中沉积和释放,从而引起流域内水体富营养化. 据有关研究^[29]证明,受磷肥应用和传统耕作习惯的影响,受人类活动影响较大的土地利用方式土壤产生的侵蚀带来的面源污染风险也高于其他土地利用方式.

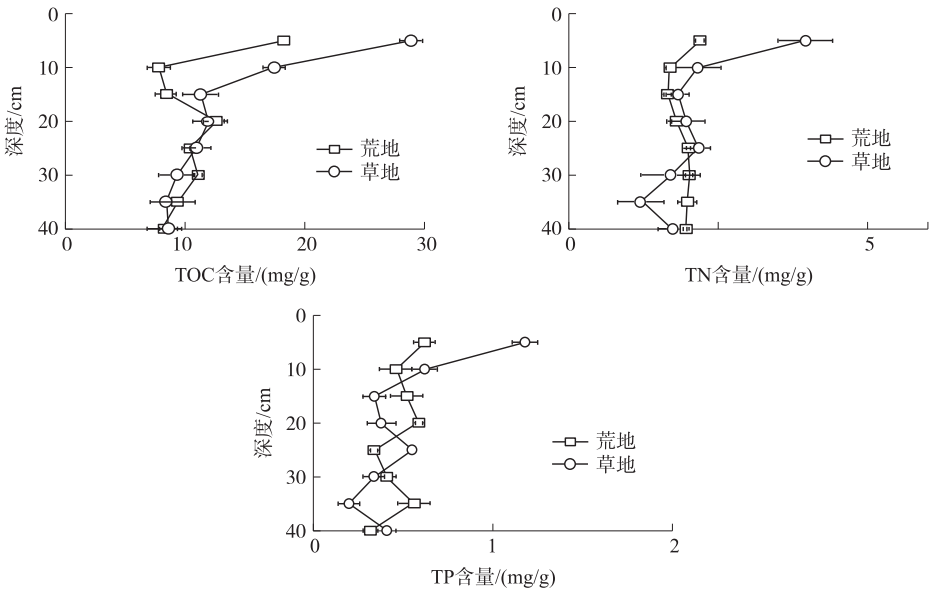


图 4 SY 小流域荒地与草地土壤养分剖面变化

Fig. 4 Profile distribution of nutrients contents in uncultivated lands and grasslands in the SY catchment

2.3 营养盐富集对水体富营养化的潜在影响评价

沉积物是湖泊流域内土壤的主要归宿之一,而沉积物作为氮、磷营养盐的储存库,很大程度上发挥着营养源的作用,因此存在于地表土壤的氮、磷营养盐随着土壤流失沉积后,在一定条件下可能成为造成湖泊富营养化的重要因素^[30]. 根据土壤中 TOC、TN 与 TP 含量,结合相应的污染指数评价方法,可以得出土壤营养盐污染对水体富营养化的潜在风险情况. 本文针对土壤 TOC 使用有机指数评价方法和标准,对土壤 TN、TP 使用单一因子的标准指数法进行评价. SHB 和 SY 流域土壤样品 OI 、 $TN-S_i$ 、 $TP-S_i$ 指数列于表 4.

表 4 小流域污染风险评价指数

Table 4 Pollution risk assessment index in the small catchments

小流域名称	土地利用方式		OI	$TN-S_i$	$TP-S_i$
SHB	荒地	0~20 cm	0.16	2.82	0.40
		平均值	0.09	2.33	0.38
	林地	0~20 cm	0.32	3.13	0.37
		平均值	0.13	2.16	0.41
	草地	0~20 cm	0.34	3.45	0.69
		平均值	0.28	3.22	0.70
SY	荒地	0~20 cm	0.16	3.58	0.86
		平均值	0.13	3.42	0.84
	林地	0~20 cm	0.27	3.65	0.94
		平均值	0.20	3.45	0.78
	草地	0~20 cm	0.27	3.55	0.95
		平均值	0.22	3.51	0.83

由表 4 可见,SHB 小流域和 SY 小流域荒地 OI 均低于 0.2,属于较清洁土壤,而林地与草地 OI 分布在 0.2~0.5 之间,属于中度污染土壤;两个流域 3 种土地利用类型土壤中 TN 标准指数都大于 1.5,属于重度污染土壤,说明流域内土壤沉积后氮具有一定的生态风险效应;SHB 流域荒地与林地的 TP 标准指数均低于 0.5,属于清洁土壤,而草地属于轻度污染土壤,SY 流域 3 种土地利用类型土壤的 TP 标准指数都处于 0.5~1.0 之间,属于轻度污染土壤. 总体上看,2 个流域荒地的 OI 、 $TN-S_i$ 、 $TP-S_i$ 普遍低于林地和草地,说明受人类活动影响较大的土地利用方式土壤往往承受着较高的生态风险,这与其他研究结果^[31-32]是一致的. 此外,0~20 cm 土壤的 3 种标准指数均大于平均值,具有相对更高的污染风险,而这一部分土壤将随径流最先进入到水环境,这将引发严重的生态问题,应引起相关部门足够的重视.

3 结论

(1)不同土地利用方式下 SHB 小流域:TOC 和 TP 含量草地>林地>荒地,TN 含量草地>荒地>林地;SY 小流域:TOC 和 TN 含量草地>林地>荒地,TP 含量草地=荒地>林地. 2 个小流域内草地和林地土壤 TOC 与 TN 含量较高,说明植被在土地质量改善中具有显著促进作用.

(2)对比土壤剖面,SHB 和 SY 小流域 0~20 cm 土层中 TOC、TN、TP 含量明显高于 20~40 cm 土层,说明植物生长减弱了表层土壤的营养盐流失.

(3)采用有机指数评价方法,2 个小流域中荒地土壤均属于较清洁土壤,林地与草地为中度污染土壤. 在单一因子的标准指数法下,小流域 3 种类型土壤均存在重度 TN- S_i 超标,而荒地 TP 标准指数低于林地和草地,说明人类扰动是提升土壤污染风险的重要因素;由于最终进入水体的总氮量受到土壤所在环境的植被生长情况、地形坡度、土壤流失状况的影响,土壤中总氮含量高,并不意味着一定会导致水体富营养化,但是如果表层土壤 OI 、TP- S_i 指数都相对较高,就应当引起重视.

[参考文献]

- [1] 金相灿. 中国湖泊富营养化[M]. 北京:中国环境科学出版社,1992:8-12.
- [2] 吴雅丽,许海,杨桂军,等. 太湖水体氮素污染状况研究进展[J]. 湖泊科学,2014,26(1):19-28.
- [3] KRONVANG B, GRAESBØLL P, LARSEN S E, et al. Diffuse nutrient losses in Denmark[J]. Water science and technology, 1996, 33(4/5):81-88.
- [4] 周慧平,高超. 巢湖流域非点源磷流失关键源区识别[J]. 环境科学,2008,29(10):2 696-2 702.
- [5] 李秀芬,朱金兆,顾晓君,等. 农业面源污染现状与防治进展[J]. 中国人口·资源与环境,2010,20(4):81-84.
- [6] ZUAZO V H D. Soil-erosion and runoff prevention by plant covers: a review[J]. Agronomy for sustainable development, 2008, 28(1):65-86.
- [7] MUNODAWAFA A. Assessing nutrient losses with soil erosion under different tillage systems and their implications on water quality[J]. Physics and chemistry of the Earth parts a/b/c, 2007, 32(15/18):1 135-1 140.
- [8] EKHOLM P, LEHTORANTA J. Does control of soil erosion inhibit aquatic eutrophication? [J]. Journal of environmental management, 2012, 93(1):140-146.
- [9] BAKKER M M, GOVERS G, DOORN A V, et al. The response of soil erosion and sediment export to land-use change in four areas of Europe: the importance of landscape pattern[J]. Geomorphology, 2008, 98(3/4):213-226.
- [10] 马广文,王业耀,香宝,等. 长江上游流域土地利用对面源污染影响及其差异[J]. 农业环境科学学报,2012,31(4):791-797.
- [11] WANG H J, SHI X Z, YU D S, et al. Factors determining soil nutrient distribution in a small-scaled watershed in the purple soil region of Sichuan Province, China[J]. Soil and tillage research, 2009, 105(2):300-306.
- [12] 耿润哲,李明涛,王晓燕,等. 基于 SWAT 模型的流域土地利用格局变化对面源污染的影响[J]. 农业工程学报,2015, 31(16):241-250.
- [13] 杨文龙,杨树华. 滇池流域非点源污染控制区划研究[J]. 湖泊科学,1998,10(3):55-60.
- [14] 徐美娜. 滇南小流域沉积有机质源解析及其影响机制[D]. 南京:南京师范大学,2016.
- [15] 钱君龙,张连弟. 土壤理化分析[M]. 上海:上海科学技术出版社,1978:62-67.
- [16] 隋桂荣. 太湖表层沉积物中 OM、TN、TP 的现状与评价[J]. 湖泊科学,1996,8(4):319-324.
- [17] LEIVUORI M, NIEMISTÖ L. Sedimentation of trace metals in the Gulf of Bothnia[J]. Chemosphere, 1995, 31(8):3 839-3 856.
- [18] 彭近新,陈慧君. 水质富营养化与防治[M]. 北京:中国环境科学出版社,1988:48-62.
- [19] 李任伟. 沉积物污染和环境沉积学[J]. 地球科学进展,1998,13(4):398-402.
- [20] 陈春瑜,和树庄,胡斌,等. 土地利用方式对滇池流域土壤养分时空分布的影响[J]. 应用生态学报,2012,23(10):2 677-2 684.
- [21] LENKA N K, DASS A, SUDHISHRI S, et al. Soil carbon sequestration and erosion control potential of hedgerows and grass filter strips in sloping agricultural lands of eastern India[J]. Agriculture ecosystems and environment, 2012, 158(6):31-40.
- [22] 李鉴霖,江长胜,郝庆菊. 缙云山不同土地利用方式土壤有机碳组分特征[J]. 生态学报,2015,35(11):3 733-3 742.

- [23] COLLINS H P, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K, et al. Soil carbon pools and fluxes in long-term corn belt agroecosystems[J]. Soil biology and biochemistry, 2000, 32(2): 157-168.
- [24] 傅华, 陈亚明, 王彦荣, 等. 阿拉善主要草地类型土壤有机碳特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2004, 24(3): 469-476.
- [25] NAVAS A, GASPAR L, QUIJANO L, et al. Patterns of soil organic carbon and nitrogen in relation to soil movement under different land uses in mountain fields(South Central Pyrenees)[J]. Catena, 2012, 94(94): 43-52.
- [26] LIANG Q, CHEN H, GONG Y, et al. Effects of 15 years of manure and inorganic fertilizers on soil organic carbon fractions in a wheat-maize system in the North China Plain[J]. Nutrient cycling in agroecosystems, 2012, 92(1): 21-33.
- [27] 刘艳丽, 李成亮, 高明秀, 等. 不同土地利用方式对黄河三角洲土壤物理特性的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(15): 5 183-5 190.
- [28] 张阳. 黄河下游典型土地利用方式下土壤碳、氮分布与变化机制研究[D]. 开封: 河南大学, 2015.
- [29] HESHMATI M, ARIFIN A, SHAMSHUDDIN J, et al. Predicting N, P, K and organic carbon depletion in soils using MPSIAC model at the Merek catchment, Iran[J]. Geoderma, 2012, s 175/176(3): 64-77.
- [30] 宋金明, 李学刚, 邵君波, 等. 南黄海沉积物中氮、磷的生物地球化学行为[J]. 海洋与湖沼, 2006, 37(4): 370-376.
- [31] 王晓燕, 王一岫, 王晓峰, 等. 密云水库小流域土地利用方式与氮磷流失规律[J]. 环境科学研究, 2003, 16(1): 30-33.
- [32] 杨艳芳, 邵婷, 吕梦宇, 等. 龙窝湖湿地不同土地利用方式土壤养分和重金属污染特征[J]. 生态学杂志, 2014, 33(5): 1 312-1 318.

[责任编辑: 丁 蓉]

(上接第 128 页)

- [8] 陈明, 蔡青云, 徐慧, 等. 水体沉积物重金属污染风险评价研究进展[J]. 生态环境学报, 2015, 24(6): 1 069-1 074.
- [9] 万国江. 现代沉积的²¹⁰Pb 计年[J]. 第四纪研究, 1997(3): 230-239.
- [10] APPLEBY P G. Chronostratigraphic techniques in recent sediments[M]. Netherlands: Springer, 2002: 171-203.
- [11] 王心宇, 周丰, 伊旋, 等. 滇池沉积物中主要污染物含量时间分异特征研究[J]. 环境科学, 2014, 35(1): 195-200.
- [12] 焦伟. 湖泊湖滨带沉积物重金属污染研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2010.
- [13] 滑丽萍, 华珞, 高娟, 等. 中国湖泊底泥的重金属污染评价研究[J]. 土壤, 2006, 38(4): 366-373.
- [14] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sediment tecological approach[J]. Water research, 1980, 14(8): 975-1 001.
- [15] 徐燕, 李淑芹, 郭书海, 等. 土壤重金属污染评价方法的比较[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(11): 4 615-4 617.
- [16] 曹玲珑, 王建华, 黄楚光, 等. 大亚湾表层沉积物重金属元素形态特征、控制因素及风险评价分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(6): 1 988-1 999.
- [17] LIU W, WU J, ZENG H, et al. Geochemical evidence of human impacts on deep Lake Fuxian, southwest China[J]. Limnological-ecology and management of inland waters, 2014, 45(3): 1-6.
- [18] 赵彦锋, 郭恒亮, 孙志英, 等. 基于土壤学知识的主成分分析判断土壤重金属来源[J]. 地理科学, 2008, 28(1): 45-50.
- [19] 朱青青, 王中良. 中国主要水系沉积物中重金属分布特征及来源分析[J]. 地球与环境, 2012, 40(3): 305-313.

[责任编辑: 丁 蓉]