

# 退耕对滇池湖滨土壤理化性质与无机磷分布的影响

李建查<sup>1,2</sup>, 张国盛<sup>1</sup>, 倪振伟<sup>1</sup>, 薛江雪<sup>1</sup>

(1. 云南大学 环境科学与生态修复研究所, 云南 昆明 650091; 2. 云南省农业科学研究院热区生态农业研究所, 云南 元谋 651300)

**摘要:** [目的] 明晰退耕对滇池湖滨土壤理化性质和土壤磷素形态分布的影响, 进而评价退耕的土壤恢复效应和环境效应。[方法] 采用空间代替时间的研究方法, 对比研究滇池湖滨缓冲带和设施农田剖面土壤理化性质以及无机磷剖面分布特征, 并且以滇池湖滨 3 个区域(牛恋、海埂、兴隆)相同退耕方式为对照进行研究。[结果] 退耕 3 a 后, 牛恋缓冲带浅表地下水埋深明显变浅, 土壤有机碳和全氮含量明显增加, 土壤全磷, Olsen-P, Al-P 和 Fe-P 含量均明显降低, O-P 含量明显增加。但是浅表地下水埋深较深的海埂缓冲带土壤理化性质和无机磷组分没有发生明显变化。兴隆缓冲带土壤有机碳和全氮含量明显降低。3 a 内退耕没有直接对土壤理化性质和无机磷组分产生明显影响, 浅表地下水埋深改变是影响土壤恢复和无机磷组分变化的直接原因之一。[结论] 滇池湖滨缓冲带和设施农田土壤磷素均存在淋失风险, 退耕活动通过抬高浅表地下水水位加速土壤磷素淋失从而降低土壤潜在淋失风险。

**关键词:** 缓冲带; 设施农田; 土壤理化性质; 土壤无机磷

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)03-0095-06

中图分类号: S153.6<sup>+</sup>1, S151.9<sup>+</sup>3

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.03.023

## Effect of Restoration on Soil Physicochemical Properties and Distribution of Soil Inorganic Phosphorus in Dianchi Lake Catchment

LI Jiancha<sup>1,2</sup>, ZHANG Guosheng<sup>1</sup>, NI Zhenwei<sup>1</sup>, XUE Jiangxue<sup>1</sup>

(1. Institute of Environmental Sciences and Ecological Restoration,

Yunnan University, Kunming, Yunnan 650091, China; 2. Hot Region Eco-agriculture

Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Yuanmou, Yunnan 651300, China)

**Abstract:** [Objective] In order to clarify the effect of restoration on soil physicochemical properties and distribution of soil inorganic phosphorus at Dianchi lake catchment, to assess the effects of restoration on soil recover and environment. [Methods] The way of space-time substitution was used. Soil physicochemical properties and phosphorus fractions were compared between vegetable field and riparian buffer in soil profile at Dianchi lake catchment. Three areas with similar restoration type were used to compare with each other in the Dianchi riparian. [Results] After the 3 years since restored from field, shallow groundwater level was shallower in Niulian buffer than in Niulian field. The content of soil organic carbon and nitrogen were more in Niulian buffer than in Niulian field, the content of total phosphorus, Olsen-P, Al-P and Fe-P were less in Niulian buffer than in Niulian field, the content of O-P was more in Niulian buffer than in Niulian field. The shallow groundwater level in Haigeng buffer was similar to shallow groundwater level in Haigeng field, but compared with Haigeng field, soil physicochemical properties and soil inorganic phosphorus fractions had no significant change in Haigeng buffer. Compared with Xinglong field, content of soil organic carbon and nitrogen decreased significantly in Xinglong buffer. The restoration had no significant effect on soil restoration and soil inorganic phosphorus fractions directly in 3 years. But changing shallow groundwater level had a significant effect on soil physicochemical properties and distribution of soil inorganic phosphorus directly in 3 years. [Conclusion] Buffer and vegetable field had risk of phosphorus leaching loss in the Dianchi riparian.

收稿日期: 2014-04-04

修回日期: 2014-04-20

资助项目: 国家自然科学基金资助项目“以本地及外来植物为优势种的植物群落对滇中土壤质量影响的比较研究”(31060085); 国家科技重大专项“滇池流域万亩农田面源污染综合控制技术与工程示范”(2012 ZX07102-003-01)

第一作者: 李建查(1988—), 女(彝族), 云南省宣威市人, 硕士研究生, 主要研究方向为污染生态学。E-mail: 921271713@qq.com。

通信作者: 张国盛(1971—), 男(汉族), 甘肃省陇南市人, 博士, 副教授, 主要从事土壤生态和水土资源保护研究。E-mail: gshzhang@ynu.edu.cn。

Restoration enhanced the speed of phosphorus leaching and reduced potential leaching risk through raising shallow groundwater level.

**Keywords:** buffer; vegetable field; soil physicochemical properties; soil inorganic phosphorus

滇池湖滨是滇中蔬菜、花卉的主产地之一。由于长期高强度施肥,而磷当季利用率仅有 10%~25%,因此,大量磷就以各种化学形态的无机磷累积在土壤中,成为滇池水体污染负荷的重要来源之一。而缓冲带的建设被认为是削减农田面源污染输出的有效途径,因此,自 2009 年滇池流域开展了“四退三还”治理工程,环湖 100~200 m 范围内约 2 000 hm<sup>2</sup> 湖滨农田退耕并建设成缓冲带,旨在实现土壤恢复和生物多样性恢复,并削减农业面源污染输出。缓冲带主要通过吸附沉淀和植物吸收等途径削减来自上游农田磷污染负荷。但是有研究表明,当土壤中所吸持的磷含量达到饱和或地下水埋深较浅时,淋溶损失成为土壤磷素向水体流失的重要途径<sup>[1-3]</sup>。滇池湖滨土壤吸持大量磷素,浅表地下水埋深较浅,土壤磷素淋溶流失可能是滇池水体污染负荷的重要面源输送途径。然而研究土壤磷素形态及剖面分布对了解土壤磷素流失特征有重要的科学意义。土壤理化性质是土壤系统中极其重要的因子,对比研究缓冲带和农田土壤理化性质,对于认识退耕过程土壤恢复有重要科学意义。因此,本研究采用空间代替时间的研究方法,对滇池南部湖滨农田与缓冲带剖面土壤理化性质以及土壤磷素剖面分布特征对比研究,选择滇池南部 3 个区域(牛恋、海埂、兴隆)的相同退耕方式相互对照研究,以期揭示滇池湖滨退耕过程中土壤恢复状况和土壤磷素分布特征,初步探讨退耕过程中土壤磷素环境效应变化规律,为深入探讨滇池湖滨退耕建设缓冲带提供基础数据支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于昆明市滇池南部湖滨区(24°70′09″N, 102°69′18″E),海拔 1 892 m。当地气候属于大陆性季风季候,雨季集中在 6—10 月,年平均气温 15 ℃。该区域土地利用方式主要是设施农田和退耕建设的缓冲带。设施农田以大棚蔬菜和花卉种植为主;湖滨缓冲带由 2009 年退耕的设施农田构成,以人工种植的柳树(*Salix babylonica*)和中山杉(*Ascendens mucronatum*)为建群种的植物群落为主。根据不同区域相同退耕方式(兴隆,位于滇池南偏东部;海埂,位于滇池南部;牛恋,位于滇池南偏西部)及其土地利用方式,在研究区选择 6 块样地:兴隆缓冲带(XL-B)、兴

隆农田(XL-F)、海埂缓冲带(HG-B)、海埂农田(HG-F)、牛恋缓冲带(NL-B)和牛恋农田(NL-F)。牛恋农田与缓冲带有地表水的交换,NL-F 排出的灌溉水排入排水沟储存,再经过 NL-B 进入 XL-F 灌溉;海埂缓冲带(HG-B)与其农田(HG-F)没有地表水的交换;兴隆缓冲带(XL-B)与兴隆农田(XL-F)也没有地表水的交换。相同区域的不同土地利用方式的土壤为对照研究,不同区域的相同退耕方式相互对照。各样地浅表地下水埋深如表 1 所示。牛恋缓冲带浅表地下水埋深显著较农田的低,海埂缓冲带和兴隆缓冲带与其农田浅表地下水埋深均没有明显差异。

表 1 各样地浅表地下水埋深

土地利用方式	浅表地下水埋深/m		
	兴隆区	海埂区	牛恋区
缓冲带	0.625 <sup>aA</sup>	0.925 <sup>aA</sup>	0.248 <sup>bB</sup>
农田	0.500 <sup>aA</sup>	0.675 <sup>aA</sup>	0.700 <sup>aA</sup>

注:不同上标小写字母表示同一列数据间存在显著差异( $p < 0.05$ ),不同大写字母表示同一行数据间存在显著差异( $p < 0.05$ )。

### 1.2 样品采集和处理

2012 年 3 月对滇池湖滨区缓冲带和农田均各布置 5 个土壤采样点。每个土壤采样点采取 0—20, 20—40, 40—60, 60—80, 80—100 cm 土层的土壤。土样风干磨碎过 2 mm 土样筛。

### 1.3 分析测定与统计方法

土壤有机碳采用重铬酸钾外加热法测定;土壤密度采用比重瓶法测定;土壤机械组成采用比重计法测定;pH 值采用水土比 5:1 电极法测定;土壤全磷采用 HClO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 消煮;土壤有效磷(Olsen-P)采用 0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub> 提取;用钼锑抗比色法测磷;土壤无机磷形态采用张守敬和 Jackson 的分组方法分析,先用 1 mol/L NH<sub>4</sub>Cl 提取水溶性磷,之后用 0.5 mol/L NH<sub>4</sub>F 提取 Al-P,再用 0.1 mol/L NaOH 提取 Fe-P,继续用 0.3 mol/L 柠檬酸钠和连二亚硫酸钠提取 O-P,最后用 0.5 mol/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 提取 Ca-P;用钼锑抗比色法测定以上提取液中的磷。

数据分析采用 SPSS 19.0 统计软件进行方差分析和 LSD 0.05 多重比较。

## 2 结果与分析

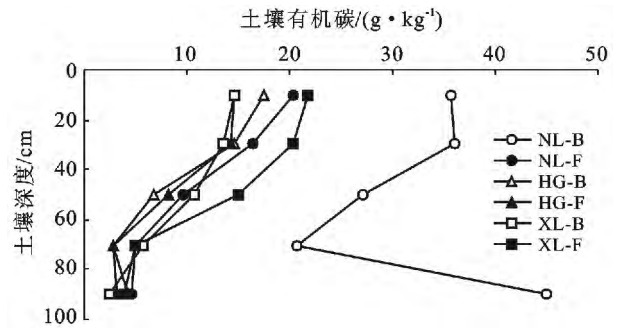
### 2.1 土壤理化性质

滇池湖滨区缓冲带和农田土壤剖面有机碳含量

随土壤深度增加而减少(图 1),但是牛恋缓冲带土壤剖面深处存在高有机碳含量土层,这可能与其早期埋藏层有关。缓冲带与农田土壤有机碳含量对比分析结果显示:兴隆缓冲带有机碳含量显著低于其农田,这与该区农田施加有机肥以及缓冲带进行放牧活动有关。虽然海埂缓冲带人为活动减少,但是,由于地下水位埋深较深,植被覆盖率恢复较低,土壤有机物分解作用强,导致缓冲带有机碳含量略微高于其农田,但是差异不显著。牛恋缓冲带有机碳含量显著高于其农田,是农田的 2.9 倍。李丽等研究表明,土壤淹水条件下能提高土壤有机碳含量<sup>[4]</sup>,并且只有牛恋缓冲带浅表地下水埋深显著低于其农田。这说明 3 a 内退耕没有直接对土壤有机碳含量产生明显影响,而是通过改变地下水埋深影响缓冲带土壤有机碳含量。

如图 2 所示,土壤全氮含量与土壤有机碳含量变化趋势一致,并且土壤全氮与有机碳含量极显著正相关( $r=0.971^{**}$ ,  $n=35$ )。缓冲带和农田土壤密度变化趋势均与土壤有机碳含量变化趋势相反,并且土壤密度与有机碳含量呈极显著负相关关系( $r=-0.746^{**}$ ,

$n=35$ )。各缓冲带与其农田土壤 pH 值介于 6.2~7.2, 差异均不显著。滇池湖滨缓冲带及农田土壤质地均为黏土。牛恋缓冲带 0—40 cm 砂粒含量显著高于其农田,粉粒含量显著低于其农田,黏粒含量没有显著差异。海埂和兴隆缓冲带和农田土壤各粒级含量均无显著差异。这与牛恋缓冲带较细颗粒在水动力作用下向深层土壤迁移有关。



注:HL-B为牛恋缓冲带,NL-F为牛恋农田,HG-B为海埂缓冲带,HG-F为海埂农田,XL-B为兴隆缓冲带,XL-F为兴隆农田区。下同。

图 1 不同土地利用方式土壤有机碳

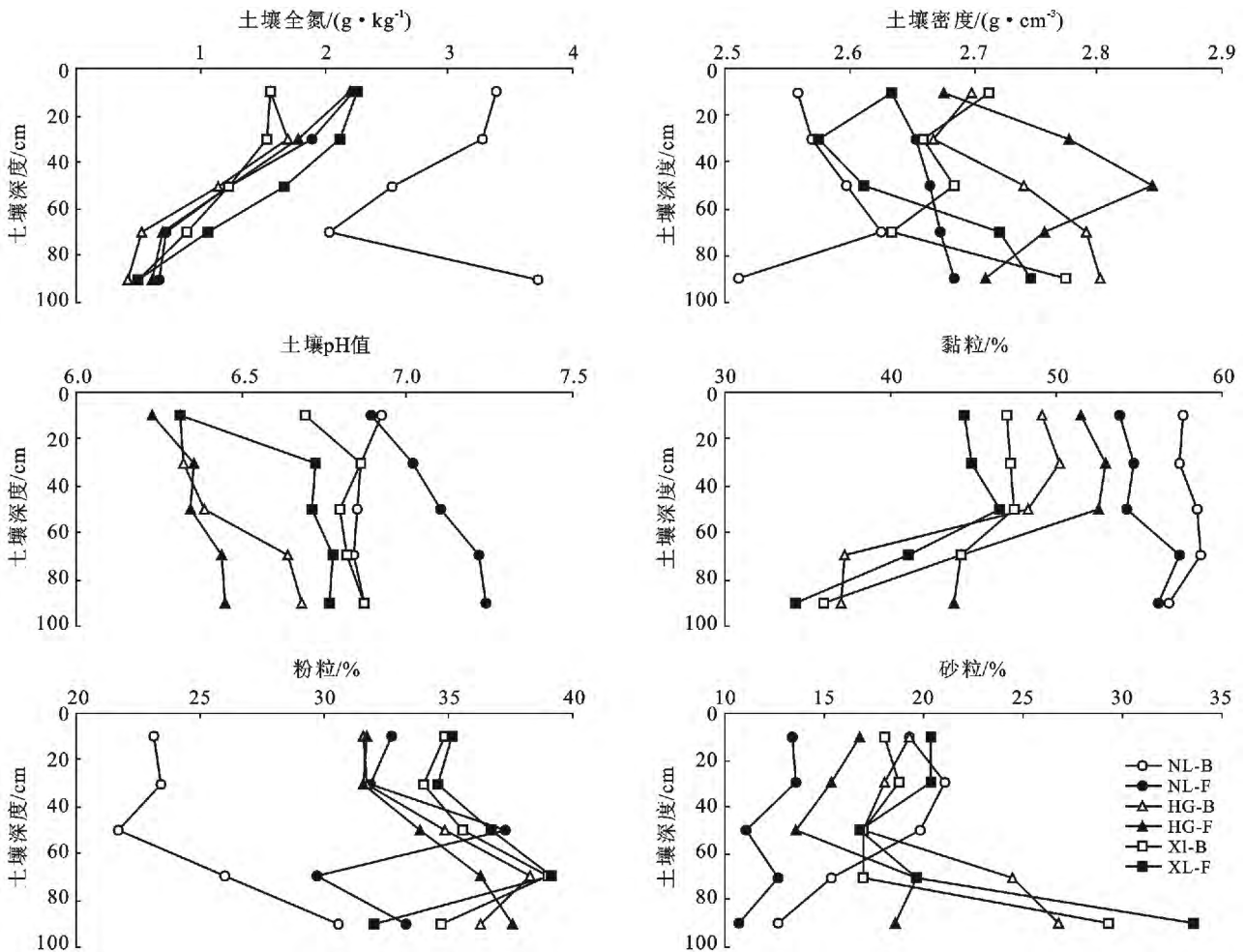


图 2 不同土地利用方式土壤理化性质

研究表明 3 a 内退耕没有对土壤质地产生明显影响。有研究表明,土壤黏粒、有机碳和全氮是评价土壤恢复的有效指标<sup>[5]</sup>。这表明 3 a 内退耕没有直接对土壤恢复产生效应,而浅表地下水埋深可能是影响滇池湖滨缓冲带土壤恢复的重要因素之一。

### 2.2 土壤磷素分布

兴隆农田、海埂农田、牛恋农田以及兴隆缓冲带各土层全磷含量差异不显著,海埂缓冲带土壤全磷富集在土壤表层,牛恋缓冲带 0—40 cm 土层全磷含量显著高于其他各土层(图 3)。说明滇池湖滨农田土壤全磷淋失严重,导致土壤剖面全磷含量差异不显著<sup>[6]</sup>。这可能与农田大量施肥、频繁耕作和灌溉等因

素导致磷素强烈淋溶下移有关。虽然缓冲带已经没有施肥,但是兴隆和海埂区缓冲带土壤表层全磷含量与其对应农田均差异不显著。

虽然牛恋湖滨缓冲带土壤不再有磷肥施入,但是其 0—40 cm 土层全磷含量与农田土壤的差异不显著,这与农田灌溉水经过缓冲带表土输入有关。牛恋缓冲带 40—100 cm 土层土壤全磷含量显著低于农田,比农田低 23.7%,但是兴隆和海埂缓冲带土壤全磷含量与其对应农田差异均不显著。说明地下水埋深是影响土壤剖面全磷含量的关键因素之一。这与渍水还原条件下,土壤磷素含量降低<sup>[7]</sup>的研究结果一致。

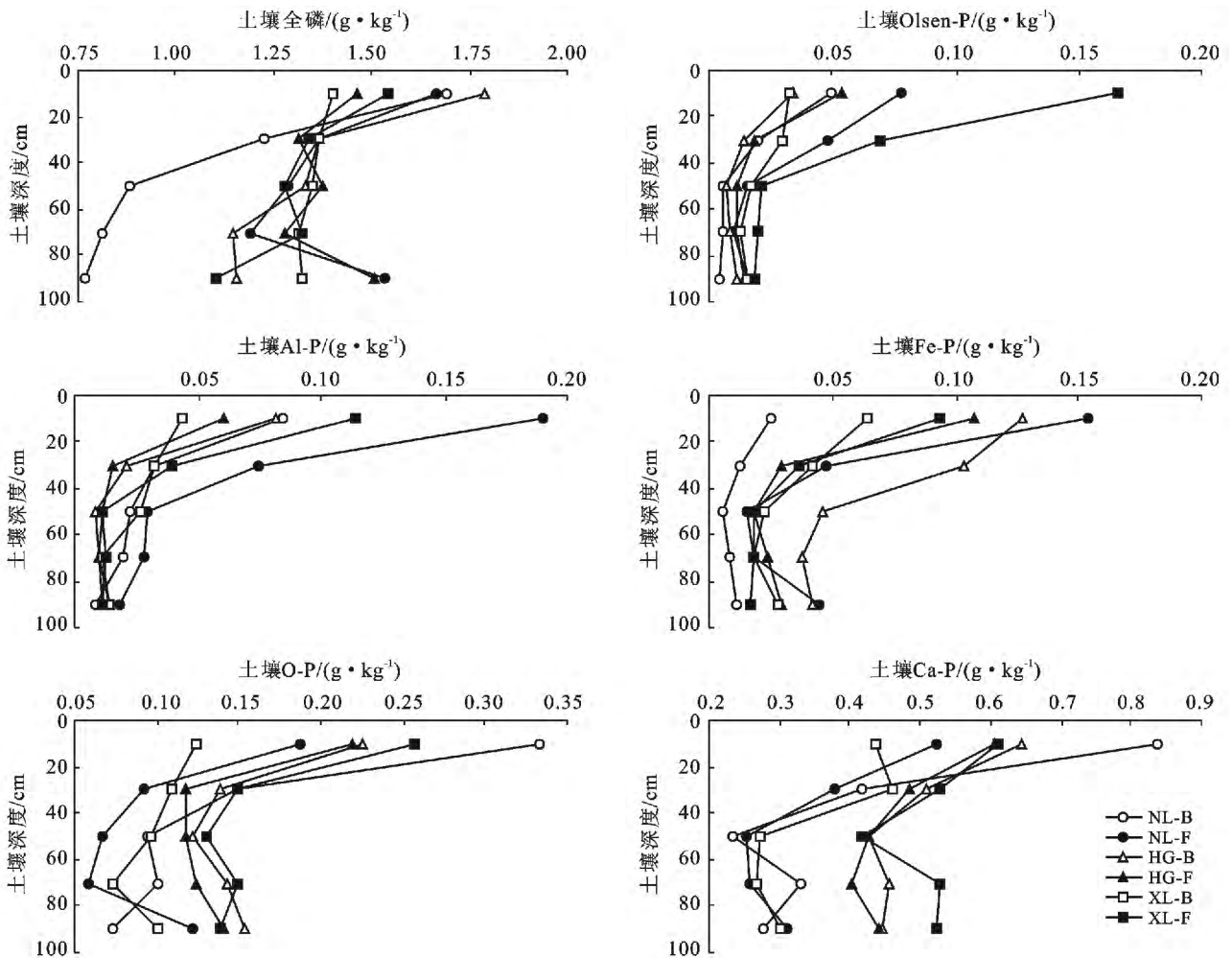


图 3 不同土地利用方式土壤磷素剖面分布

滇池湖滨土壤有效磷主要富集在土壤表层。对土壤表层 Olsen-P 含量分析结果显示:兴隆缓冲带土壤表层 Olsen-P 含量显著低于农田,比农田低 80.4%,这与兴隆农田土壤施有机肥提高土壤磷素有效性有关。虽然退耕 3 a 后,海埂农田正常进行施肥活动,而海埂缓冲带土壤不再施磷肥,但是海埂缓冲

带土壤表层 Olsen-P 含量与农田含量差异不显著。牛恋缓冲带土壤表层 Olsen-P 含量显著低于农田,比农田低 35.6%,这是因为渍水还原条件下,土壤磷素有效性降低<sup>[8]</sup>,同时,牛恋农田土壤大量施磷肥,提高其土壤磷素有效性。对土壤剖面 Olsen-P 含量分析结果也呈现出一致的变化趋势。说明施加有机肥以

及改变浅表地下水埋深也是影响土壤磷素有效性的关键因素。兴隆缓冲带、海埂缓冲带和牛恋缓冲带表层土壤 Olsen-P 含量超出土壤磷素淋失“突变点” $60 \text{ mg/kg}^{[9-11]}$  的样点占总数的百分数分别为 20%, 40%, 20%, 而兴隆农田、海埂农田和牛恋农田土壤达 100%, 40%, 40%。兴隆农田土壤磷素淋失强烈, 这可能与兴隆农田大量施加有机肥, 增加土壤磷素淋失风险有关。兴隆农田退耕 3 a 后土壤磷素潜在淋失风险明显降低, 海埂没有明显变化, 牛恋有所降低。因为兴隆农田退耕后, 虽然浅表地下水埋深没有明显改变, 但是其土壤有机碳含量明显降低, 导致土壤 Olsen-P 含量明显降低; 海埂农田退耕后, 土壤有机碳含量没有明显变化, 其浅表地下水埋深也没有明显改变; 牛恋农田退耕后, 虽然土壤有机碳含量显著提高, 但是由于退耕引起浅表下水埋深明显变浅, 土壤磷素淋溶流失, 导致现存的土壤 Olsen-P 含量降低, 并且其较浅地下水埋深对土壤磷素淋溶的影响强度超过土壤有机碳含量对土壤磷素淋溶的影响强度。说明滇池湖滨缓冲带和农田土壤磷素均存在淋失风险, 3 a 内退耕活动没有直接改变土壤磷素淋失风险, 而是通过抬高地下水水位加速土壤磷素淋失从而降低土壤潜在淋失风险。

滇池湖滨缓冲带和农田土壤无机磷均以 Ca-P 为主, 其含量占无机磷总量的 56%~81%, O-P 次之, Al-P 和 Fe-P 含量最低, 分别占无机磷总量的 12%~24%, 5%~10% 和 2%~10%, 各无机磷组分不同程度地聚集在 0—40 cm 土层。对缓冲带和农田 0—40 cm 土层的 Fe-P 对比分析表明, 兴隆缓冲带和海埂缓冲带土壤 Fe-P 含量与各自对应农田差异均不显著, 但是牛恋缓冲带土壤 Fe-P 含量显著低于其农田, 比农田低 80.5%。这说明浅表地下水埋深是影响土壤 Fe-P 含量的关键因素之一。这与渍水还原条件下, 磷素会被还原释放<sup>[12-13]</sup> 的研究结果一致。Al-P 含量对比分析结果与土壤 Fe-P 含量变化趋势一致, 这可能与二者在土壤中的存在方式较为相似有关。说明牛恋缓冲带剖面土壤全磷损失的主要途径是 Fe-P 和

Al-P 的淋溶损失。对缓冲带和农田 0—40 cm 土层的 O-P 对比分析表明, 兴隆缓冲带土壤 O-P 含量显著低于其农田, 比农田低 42.5%。海埂缓冲带土壤 O-P 含量高于其农田, 但差异不显著。牛恋缓冲带土壤 O-P 含量显著高于其农田, 比农田高 72.2%。滇池湖滨土壤 O-P 含量变化趋势与土壤有机碳含量变化趋势一致, 研究还发现土壤有机碳含量与土壤 O-P 含量显著正相关 ( $r=0.491^{**}$ ,  $n=35$ )。说明土壤有机碳是影响土壤 O-P 的关键因素之一, 这与杨丽娟等研究结果一致<sup>[14]</sup>。缓冲带和农田剖面土壤 Fe-P, Al-P, O-P 含量也表现出类似的变化趋势。对缓冲带和农田 0—40 cm 土层 Ca-P 对比分析表明, 海埂农田、兴隆农田与其对应缓冲带土壤 Ca-P 含量没有明显差异, 牛恋缓冲带 0—40 cm 土层 Ca-P 含量显著高于农田, 这与农田排灌水经过缓冲带表土再一次输入农田, 导致缓冲带截留其中的磷有关。剖面土壤 Ca-P 对比分析显示, 牛恋农田、海埂农田与缓冲带土壤 Ca-P 含量没有明显差异, 兴隆缓冲带 Ca-P 含量显著低于农田, 这与兴隆农田土壤磷素强烈淋溶下移有关。3 a 内退耕没有直接对土壤无机磷组分产生显著影响, 而浅表地下水埋深可能是影响无机磷组分变化的重要因素之一。

### 2.3 土壤理化性质及土壤磷素之间相关性分析

相关性分析表明(表 2): 除 Fe-P 外, 其它各形态磷均与土壤有机碳和全氮含量呈现显著或极显著正相关关系, 土壤有机碳影响土壤磷素形态变化, 这与杨丽娟等研究结果一致<sup>[14]</sup>。土壤无机磷与土壤 pH 值负相关, 土壤 pH 值影响土壤无机磷含量。土壤无机磷含量与土壤密度负相关, 这与土壤密度受土壤有机碳含量影响有关。说明土壤有机碳含量、pH 值和土壤密度对土壤磷素形态变化有影响。Olsen-P 含量与土壤全磷、Al-P, Fe-P, O-P 和 Ca-P 含量显著或极显著正相关性, Olsen-P 含量与土壤 Al-P, Fe-P 和 Ca-P 的相关性均高于与土壤全磷的相关性, 说明土壤磷素有效性主要受控于土壤无机磷, 这与杨丽娟等研究结果一致<sup>[14]</sup>。

表 2 土壤理化性质及土壤磷素之间相关性

项目	TP	Olsen-P	全氮	有机碳	pH 值	密度
Al-P	0.727**	0.766**	0.526**	0.451**	-0.040	-0.401*
Fe-P	0.741**	0.634**	0.307	0.217	-0.265	-0.143
O-P	0.545**	0.573**	0.488**	0.491**	-0.345*	-0.188
Ca-P	0.707**	0.625**	0.494**	0.426*	-0.334	-0.172
Olsen-P	0.608**	1	0.488**	0.426*	-0.170	-0.375*

注: \*\* 在 0.01 水平(双侧)上显著相关; \* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关,  $N=35$ 。

### 3 结论

退耕 3 a 后,牛恋缓冲带浅表地下水埋深明显变浅,其土壤有机碳和全氮含量明显增高,土壤全磷、Olsen-P、Al-P 和 Fe-P 含量明显降低,而 O-P 含量增加。但是海埂缓冲带和兴隆缓冲带浅表地下水埋深与其对应农田没有显著差异,其土壤理化性质和无机磷组分与其对应农田的没有显著差异。这表明 3 a 内退耕没有直接对土壤恢复和无机磷组分产生效应,而浅表地下水埋深可能是直接影响土壤恢复和土壤磷素形态分布的重要因素之一。3 a 内退耕通过抬高地下水位加速土壤磷素淋失从而降低土壤潜在淋失风险。土壤有机碳含量、土壤密度和 pH 值等缓冲带土壤恢复有效指标对土壤磷素组分有显著影响。因此,短期内,滇池湖滨建设应该通过控制其地下水埋深来权衡土壤恢复和土壤磷素淋失。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 单艳红,杨林章,王建国. 土壤磷素流失途径、环境影响及对策[J]. 土壤,2004,36(6):602-608.
- [2] Hesleth N, Brooks P C. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching [J]. J. Environ Qual., 2000,29(1):105-110.
- [3] Djodjic F, Borling K, Bergstrom L. Phosphorus leaching in relation to soil type and soil phosphorus content[J]. J. Environ. Qual., 2004,33(2):678-684.
- [4] 李丽,高俊琴,雷光春,等. 若尔盖不同地下水位泥炭湿地土壤有机碳和全氮分布规律[J]. 生态学杂志,2011,30(11):2445-2449.
- [5] 张平究,赵永强,孟向东,等. 退耕还湖后安庆沿江湿地土壤理化性质变化[J]. 土壤通报,2011,42(6):1319-1323.
- [6] 邱亚群,甘国娟,刘伟,等. 湖南典型土壤磷素剖面分布特征及其流失风险[J]. 中国农学通报,2012,28(8):223-227.
- [7] 向万胜,童成立,吴金水,等. 湿地农田土壤磷素的分布、形态与有效性及磷素循环[J]. 生态学报,2001,21(12):2067-2073.
- [8] 张杨珠,蒋有利,黄运湘,等. 稻作制、有机肥和地下水位对红壤性水稻土磷的吸持作用的影响[J]. 土壤学报,1998,35(3):328-336.
- [9] Heckrath G, Brookes P C, Poulton P R, et al. Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentrations in the broad balk experiment[J]. J. Environ. Qual., 1995,24(3):904-910.
- [10] 王彩绒,胡正义,杨林章,等. 太湖典型地区蔬菜地土壤磷素淋失风险[J]. 环境科学学报,2005,25(1):76-80.
- [11] 吕家珑, Fortune S, Brooks P C. 土壤磷淋溶状况及其 Olsen 磷“突变点”研究[J]. 农业环境科学学报,2003,22(2):142-146.
- [12] 何电源. 潜育性和次生潜育化水稻土的形成及改良途径的研究总结报告[J]. 农业现代化研究,1984(6):1-20.
- [13] Edward M, Thomas W. Soil and Their Management: A Sino-European Perspective [M]. London and New York: Elsevier Applied Science, 1999:321-338.
- [14] 杨丽娟,李天来,周崇峻. 塑料农田内长期施肥对菜地土壤磷素组成及其含量影响[J]. 水土保持学报,2009,23(5):205-208.
- [41] 谢承陶. 盐渍土改良原理与作物抗性[M]. 北京:中国农业出版社,1993:245-247.
- [42] 梁惠萍,雷利堂,王凌晖,等. 盐胁迫对油桐幼苗生长及生理特性的影响[J]. 北方园艺,2013(12):51-54.
- [43] 刘岩,彭学贤,谢友菊,等. 植物抗渗透胁迫基因工程研究进展[J]. 生物工程进展,1997,17(2):31-38.
- [44] Heuer B. Influence of exogenous application of proline and glycinebetaine on growth of salt-stressed tomato plants[J]. Plant Science, 2003,165(4):693-699.
- [45] Delauney A J, Verma D P S. Proline biosynthesis and osmoregulation in plants[J]. The Plant Journal, 1993, 4(2):215-223.
- [46] 姚元干,石雪晖,杨建国,等. 辣椒耐热性与叶片质膜透性及几种生化物质含量的关系[J]. 湖南农业大学学报,2000,26(2):97-99.
- [47] 张丽平,王秀峰,史庆华,等. 黄瓜幼苗对氯化钠和碳酸氢钠胁迫的生理响应差异[J]. 应用生态学报,2008,19(8):1854-1859.
- [48] 武香,倪建伟,张华新,等. 盐胁迫下不同盐生植物渗透调节的生理响应[J]. 东北林业大学学报,2012,40(8):29-33.

(上接第 94 页)