

元阳梯田核心区稻田土壤养分含量与微生物数量的时空变异特征*

梁 勇¹, 冯书华¹, 李 博¹, 湛方栋¹, 李 元¹,
李军萍², 何永美^{1**}

(1. 云南农业大学 资源与环境学院, 云南 昆明 650201; 2. 玉溪农业职业技术学院, 云南 玉溪 653106)

摘要:【目的】探索元阳梯田核心区稻田土壤养分含量和微生物数量的时空变异特征。【方法】在不同月份采集元阳梯田核心区箐口村不同海拔(1 450、1 500、1 600、1 700 和 1 800 m)稻田的土壤, 分析土壤养分(全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾)的含量与微生物(细菌、放线菌、自生固氮菌、纤维分解菌和真菌)的数量。【结果】低海拔梯田土壤全氮、全钾含量高于高海拔梯田土壤全氮、全钾含量, 高海拔(1 700、1 800 m)的梯田土壤碱解氮、速效磷含量要高于相对低海拔(1 450、1 500 m)的稻田, 土壤碱解氮、速效钾含量在休闲期高于水稻生长期。土壤微生物数量总体上在低海拔(1 450、1 500 m)稻田较高, 土壤自生固氮菌和放线菌在 3 月、细菌和真菌在 5 月、纤维分解菌在 9 月的数量相对较多。【结论】元阳梯田核心区稻田土壤速效养分含量与微生物数量受季节的明显影响, 并表现出明显的垂直分布特征。

关键词: 元阳梯田; 稻田土壤; 养分; 微生物; 时空变异

中图分类号: S 511.061

文献标识码: A

文章编号: 1004-390X (2019) 03-0532-06

Temporal and Spatial Variation Characteristics of Soil Nutrient Content and Microorganism Quantities of Rice Paddy in Core Zone of Yuanyang Terrace

LIANG Yong¹, FENG Shuhua¹, LI Bo¹, ZHAN Fangdong¹, LI Yuan¹,
LI Junping², HE Yongmei¹

(1. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

2. Yuxi Agriculture Vocation-Technical College, Yuxi 653106, China)

Abstract: [Purpose] To investigate the temporal and spatial variation characteristics of nutrient contents and microorganism quantities of rice paddy in core zone of Yuanyang Terrace. [Method] Soils were sampled from rice paddy of Qingkou Village in Yuanyang Terrace at different altitudes (1 450, 1 500, 1 600, 1 700 and 1 800 m) in different months. The nutrient contents (total nitrogen, phosphorus, potassium, and available nitrogen, phosphorus and potassium) and the microorganism quantities (bacteria, actinomycetes, azotobacter, cellulose decomposing bacteria and fungi) in soils were analyzed. [Results] The contents of total nitrogen and potassium in soils at a low altitude were

收稿日期: 2018-01-08

修回日期: 2019-01-07

网络出版时间: 2019-03-17

*基金项目: 国家自然科学基金项目(41565010, 31760113); 云南省农田无公害生产创新团队(2017HC015)。

作者简介: 梁勇(1991—), 男, 四川广安人, 在读硕士研究生, 主要从事农田环境与物质循环研究。

E-mail: liangyong318@163.com

**通信作者 Corresponding author: 何永美(1980—), 女, 云南大姚人, 博士, 副教授, 主要从事农业生态环境研究。E-mail: heyongmei06@126.com

网络出版地址: [http://dx.doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).201801010](http://dx.doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).201801010)



higher than that at a high altitude. The contents of available nitrogen and phosphorus at the high altitudes (1 700 and 1 800 m) were greater than those at relatively low altitudes (1 450 and 1 500 m). The contents of available nitrogen and phosphorus in soils at the fallow period were higher than that at the rice growth period. On the whole, the microorganisms' quantities were higher in the rice paddy at a low altitude (1 450, 1 500 m). The quantities of azotobacter and actinomycetes in March, bacteria and fungi in May, and cellulose decomposing bacteria in September were relatively high. [**Conclusion**] The contents of available nutrients and the microorganism quantities in rice paddy in the core zone of Yuanyang Terrace were significantly influenced by season, and showed obvious vertical distribution characteristics.

Keywords: Yuanyang Terrace; rice paddy; nutrient; microorganism; spatial-temporal variation

梯田在中国具有非常悠久的历史, 在一些山地丘陵区, 梯田是最主要的土地利用类型。梯田作为一种比较特殊的生态系统类型, 广泛分布在世界各地。中国是世界上梯田分布最广的国家之一, 稻作梯田在中国农业文化中有着很重要的地位, 随着时代的发展, 其在农业生产中的地位愈加突出。近年来, 众多学者对梯田的起源、发展、生态系统结构、经营模式等进行了研究^[1-3]。目前对农田土壤养分和微生物的研究主要集中在地形地貌、气候、土地管理状况、土壤自身的化学性质、稻田的利用方式等因素对土壤养分含量和微生物数量的影响^[4-6], 对土壤养分含量及微生物数量在时间和空间上的变化研究鲜有报道, 这制约着梯田农业的可持续发展。

梯田土壤在形成和演化过程中会受到多种环境因素的影响, 因此土壤养分含量与微生物数量的时空变异特征是比较复杂的, 是各种物理、化学和生物过程综合作用的结果^[7-8]。土壤速效氮、速效磷、速效钾在农作物生长过程中起着重要作用, 不仅受土壤性质、地形地貌、时间等自然因素影响, 同时也受到施肥、耕作方式等人为因子作用, 具有高度空间异质性特点^[9-10]。土壤特性在时间和空间上并不是完全独立的, 会在一定范围内存在时间和空间上的相关性。土壤微生物是梯田系统中不可忽视的一个重要角色, 其活动对梯田内源磷释放具有很重要的作用。梯田土壤是很多生物良好的生活环境, 土壤微生物以各自的方式参与梯田系统物质和能量的循环过程。很多研究表明: 土壤养分含量与微生物数量的时空变异特征与时间、地理位置等因素密切相关, 并受气候等自然因素和农田经营管理等人为因素以及地

区的社会经济发展水平的影响较大, 因此在一定范围内存在着空间上的相关性和时间上的可变性^[11-12]。

云南元阳梯田被誉为“世界山地农业生产的最高典范”, 其水稻种植历史悠久, 主要种植白脚老粳、月亮谷等传统地方品种^[13-14], 且不使用化学肥料和农药, 偶尔采用“冲肥”的方式施加一些农家有机肥料, 和其他地区大量使用化肥和农药的水稻种植模式大不相同。元阳梯田特有的耕作方式形成了独特的梯田耕作文化, 这种独特的土地利用方式是环境属性的综合反映。哈尼梯田主要分布于坡度为 15°~75°之间的沟壑山岭间, 梯田从海拔 100~2 000 m 都有分布, 垂直特征突出。由于海拔不同, 气候特征、土壤类型随之改变, 导致土壤的理化性质差异较大。近年来, 对哈尼梯田的垂直差异特征、农田生态系统和森林生态系统研究逐步深入^[15-18], 而对梯田土壤养分含量和微生物数量的时空变异特征的相关研究还比较少。因此, 本研究分析元阳梯田核心区箐口村不同海拔稻田的土壤稻田土壤养分含量和微生物数量的时空变异特征, 有助于进一步理解元阳梯田稻田的生态过程, 为元阳梯田资源的可持续发展和科学保护提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

哈尼梯田位于云南省元阳县, 距今已有一千多年的历史, 元阳县约有 12 667 hm² 梯田, 研究地箐口村位于元阳梯田国家湿地公园及申报世界文化遗产核心区, 保持了“森林、水系、山寨、梯田”四素同构完整的生态系统, 是一个利用地形进行农耕开发的典范。箐口村海拔 1 400~2 019 m,

年均气温 16.4 ℃, 极端最高气温 39 ℃, 极端最低气温 -2.6 ℃, 相对湿度 85%, 年平均日照时间 1 770.2 h, 梯田地区降水比较丰富, 多年平均降雨量为 1 397.6 mm, 年最高降雨量达 3 442 mm, 降水多集中 5—10 月, 降雨受地形和海拔的影响比较大, 全年有雾期 179.5 d, 年霜期仅 2 d, 属于亚热带季风气候, 干湿季十分明显。由于海拔高差大, 呈现热带、亚热带和温带三种山地垂直气候带类型, 境内地形比较复杂, 立体气候较为突出, 水稻可生长到海拔 1 950 m 左右。土壤以黄色赤红壤和黄壤为主, 梯田土层厚度约为 100 cm^[19]。

1.2 稻田土壤样品采集

2016 年 1、3、5、7、9、10 和 12 月的上旬, 在元阳县新街镇箐口村的梯田中选取具有代表性的不同海拔梯度 (1 450、1 500、1 600、1 700 和 1 800 m) 的梯田, 采集其 0~20 cm 的土壤样品, 将采集的土壤样品置于 1 000 mL 塑料桶中, 加满水密封, 写上标签, 迅速带回实验室。

1.3 土壤养分指标测定

将梯田土壤带回室内自然风干, 研磨过 100 目的土壤筛, 进行土壤养分测定。土壤全氮、全磷和全钾含量分别采用半微量凯氏定氮法、酸溶—钼锑抗比色法和火焰光度计法测定; 土壤碱解氮、速效磷和速效钾含量分别采用碱解扩散吸收法、0.5 mol/L 碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法和 1 mol/L 醋酸铵浸提—火焰光度计法测定^[20]。

1.4 土壤微生物数量测定

称取土壤样品 10.0 g, 置于装有 90 mL 无菌水的三角瓶中进行充分振荡, 获得梯田土壤悬浮液。采用稀释平板法测定土壤中各类微生物的数量, 28 ℃ 条件下, 细菌采用牛肉膏蛋白胨琼脂培养基, 培养 2 d, 真菌采用马丁氏培养基培养 3 d, 自生固氮菌采用阿须贝无氮培养基培养 5 d, 纤维素分解菌采用纤维素刚果红培养基培养 6 d, 放线菌采用改良高氏 1 号培养基培养 7 d。选取合适的稀释度, 对平板上的菌落进行计数^[21]。

另称取土壤 10.0 g, 105 ℃ 烘 6~8 h 至恒重, 得到土壤的干重, 获得该土壤含水率, 从而获得微生物计数的菌落形成单位 (cfu, colony forming unit), 即: 土壤微生物数量 (cfu/g)(干土)=每皿平均数菌落×稀释倍数/干土质量分数^[22]。

1.5 数据处理

运用 Microsoft Excel 对试验数据进行处理,

计算平均值和标准差。数据计算在 Excel 中进行, 采用统计软件 DPS 6.55, LSD 法分析不同处理间的差异显著性, 计算土壤速效养分和不同类群微生物数量间的相关系数。

2 结果与分析

2.1 元阳梯田核心区不同海拔稻田土壤养分含量特征

由表 1 可知: 5 个海拔稻田土壤全氮、全磷、全钾含量平均值分别为 2.33、0.66 和 6.05 g/kg。土壤全氮、全钾含量最高值出现在海拔 1 450 m; 全磷含量最高值出现在海拔 1 600 m。海拔 1 800 m 的梯田土壤全氮和全钾含量最低, 海拔 1 500 m 的梯田土壤全磷含量最低。

表 1 元阳梯田核心区不同海拔稻田土壤全氮、全磷和全钾含量

海拔/m altitudes	全氮 total nitrogen	全磷 total phosphorus	全钾 total potassium
1 450	2.65±0.02 a	0.68±0.05 a	6.57±0.04 a
1 500	2.38±0.08 b	0.58±0.01 a	6.55±0.32 a
1 600	2.42±0.03 b	0.75±0.09 a	6.25±0.06 a
1 700	2.48±0.03 b	0.60±0.05 a	6.34±0.40 a
1 800	1.76±0.04 c	0.72±0.01 a	4.54±0.07 b

注: 不同小写字母表示 0.05 水平上的显著差异。

Note: Different lowercases mean significant difference at 0.05 level.

2.2 元阳梯田稻田土壤速效养分含量的时空变异特征

由图 1 可知: 元阳梯田箐口村 5 个海拔稻田 0~20 cm 土层土壤速效养分含量存在差异, 且比较各月、各海拔梯田稻田的土壤碱解氮、速效磷和速效钾含量发现, 海拔 1 800 m 稻田土壤速效养分含量相对较高。此外, 不同海拔梯田土壤碱解氮、速效磷、速效钾含量随时间变化有不同程度的变化, 土壤碱解氮含量最大值在海拔 1 800 m 的 3 月, 最小值在 1 700 m 的 7 月; 土壤速效磷含量最大值在海拔 1 500 m 的 9 月和 1 800 m 的 10 月, 最小值在 1 450 m 的 7 月; 土壤速效钾含量最大值在海拔 1 500 m 的 10 月, 最小值在 1 800 m 的 7 月。土壤碱解氮、速效钾含量季节变化明显, 水稻生长期 (5、7 和 9 月) 土壤碱解氮和速效钾的含量低于休闲期 (10、12、1 和 3 月) 的含量。

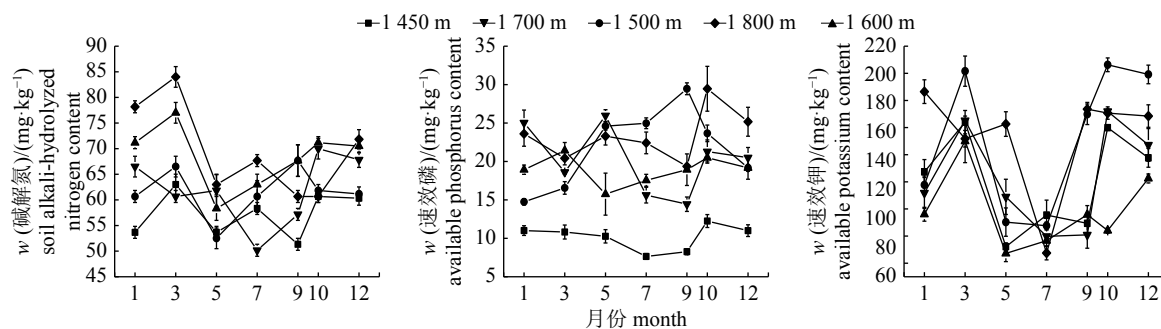


图1 元阳梯田核心区稻田土壤速效养分时空变异特征

Fig. 1 Spatial-temporal variation characteristics of available nutrients contents in rice paddy in core zone of Yuanyang Terrace

2.3 元阳梯田稻田土壤微生物数量的时空变异特征

由图2可知:不同海拔稻田土壤的细菌、自生固氮菌、纤维分解菌、放线菌和真菌数量的变化规律不一致,总体呈低海拔(1450、1500 m)的稻田土壤的微生物数量较高。不同月份而言,

元阳梯田稻田土壤3月自生固氮菌和放线菌、5月细菌和真菌、9月纤维分解菌的数量总体较多;3月细菌、7月放线菌和真菌、9月自生固氮菌、10月纤维分解菌的数量总体较少。表明元阳梯田稻田土壤微生物数量具有明显的季节性变化规律,但不同类群微生物数量的季变化规律存在差异。

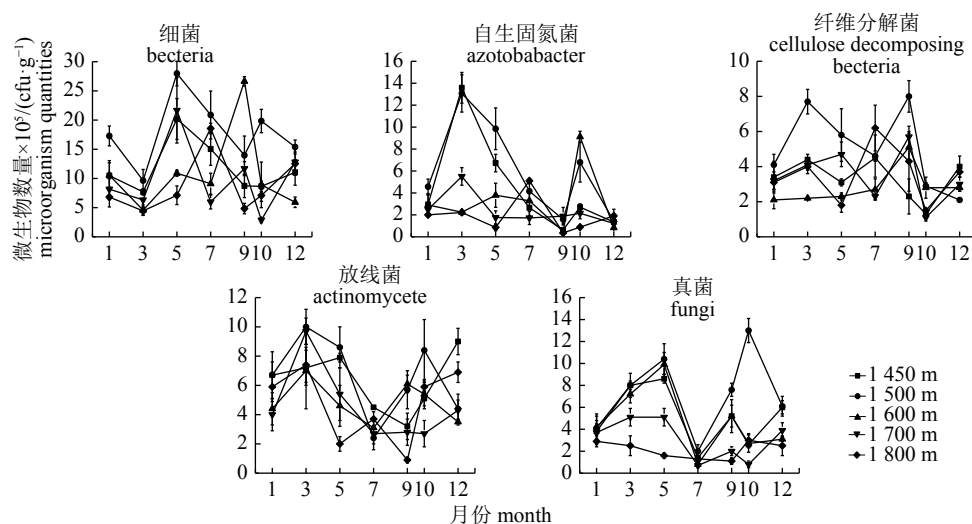


图2 元阳梯田核心区稻田土壤微生物数量的时空变异特征

Fig. 2 Spatial-temporal variation characteristics of soil microorganism quantities in rice paddy in core zone of Yuanyang Terrace

2.4 元阳梯田核心区稻田土壤速效养分与土壤微生物数量的相关性

由表2可知:除放线菌外,土壤碱解氮含量与其他土壤微生物数量均呈负相关,其中与纤维分解菌数量呈显著负相关($P<0.05$);土壤速效磷含量与放线菌、真菌、自生固氮菌数量呈负相关,与纤维分解菌数量呈显著正相关($P<0.05$);土壤速效钾含量与细菌数量呈极显著正相关($P<0.01$),与放线菌数量呈显著正相关($P<0.05$),与真菌、纤维分解菌、自生固氮菌数量呈正相关。

3 讨论

3.1 梯田土壤养分含量和微生物数量变化的机理

土壤养分时间和空间异质性普遍存在,其空间异质性主要是随机性因素和结构性因素共同作用的结果,如海拔、土壤类型、耕作制度等。元阳哈尼梯田海拔跨度大,海拔对梯田土壤养分影响大,不同海拔的温度、降水、土壤理化性质存在差异,导致一年内不同时间、不同海拔高度梯田土壤养分的差异,表现为低海拔(1450、1500 m)

表 2 元阳梯田核心区稻田土壤速效养分与土壤微生物数量间的相关系数

Tab. 2 Correlation coefficients of available nutrient contents with soil microorganism quantities of rice paddy field in core zone of Yuanyang Terrace

项目 item	细菌 bacteria	放线菌 actinomycetes	自生固氮菌 azotobacter	纤维分解菌 cellulose decomposing bacteria	真菌 fungi
碱解氮 available nitrogen	-0.290	0.072	-0.112	-0.36 [*]	-0.146
速效磷 available phosphorus	0.110	-0.066	-0.147	0.310 [*]	-0.004
速效钾 available potassium	0.629 ^{**}	0.382 [*]	0.063	0.002	0.149

注：“*”和“**”分别表示在显著 ($P<0.05$) 和极显著 ($P<0.01$) 相关 ($n=35$)。
Note: “*” and “**” mean a significant correlation at 0.05 level and a very significant correlation 0.01 level, respectively ($n=35$).

稻田的土壤全氮、全钾养分含量高于高海拔 (1 700、1 800 m) 稻田。低海拔 (1450、1500 m) 梯田开垦时间较早, 耕作时间更长, 土壤受人为干扰强烈, 梯田水从上往下流动, 高海拔梯田土壤养分随水流向低海拔汇聚^[23], 导致低海拔稻田土壤养分全量较高。但高海拔 (1 700、1 800 m) 梯田土壤速效养分含量高于低海拔梯田土壤, 这可能由于高海拔 (1 700、1 800 m) 梯田与村落距离更近, 村民生产、生活用水以及畜禽粪便等通过沟渠排入高海拔 (1 700、1 800 m) 的梯田, 从而增加高海拔梯田土壤的速效养分含量。元阳梯田水稻生长季节梯田土壤养分低于其他季节。这一阶段水稻生长旺盛, 需要养分较多, 土壤养分下降, 降水充沛, 梯田水体置换较快, 水体快速流动带走了梯田土壤的部分养分, 故该阶段的土壤养分含量普遍低于其他季节; 在水稻生长后, 秸秆还田和残茬腐烂降解, 被水稻生长所消耗的梯田土壤养分得到补充; 此外, 梯田休闲期降水稀少, 梯田水体流动较慢, 水体流动导致的土壤养分损失减少, 村庄人类生产、生活用水通过排水渠排入梯田后长时间在梯田间循环流动, 促进梯田土壤养分含量增加。

5—10 月为元阳梯田水稻生长期。水稻通过根系分泌作用, 对土壤理化性质和生物特性产生显著影响^[24-25]。水稻生长季节是全年气温较高的时段, 有利于土壤细菌增殖。因此, 元阳梯田稻田土壤细菌、自生固氮菌和纤维分解菌数量在水稻生长季节较多。此外, 元阳梯田水稻种植过程中不施化学肥料, 重要的肥料来源是水稻收获后在田间自然腐解的秸秆和残茬。放线菌和真菌是分解纤维素和木质素等较难分解物质的主要微生物, 故水稻秸秆和残茬促进了放线菌和真菌增殖, 使放线菌和真菌的数量在冬闲期较多。

3.2 梯田土壤微生物数量与养分含量动态变化的关系与机理

微生物在土壤中的数量与分布是土壤、植被和气候等综合因素相互作用的结果, 反映土壤肥力状况与植物营养之间的密切关系^[26-28]。土壤中微生物的类群、数量、分布和组成直接受养分含量、结构、土壤水分和 pH 等影响, 并与土壤类型、气候和人类生产活动等密切相关^[29-31]。梯田土壤细菌数量与速效钾含量呈极显著正相关; 土壤速效磷含量与纤维分解菌数量呈显著正相关; 土壤速效钾含量与放线菌数量呈显著正相关, 与真菌、纤维分解菌、自生固氮菌数量呈正相关, 表明梯田土壤速效养分含量与梯田土壤微生物数量之间存在着一定相关性, 梯田土壤为微生物的生长和代谢提供碳源和氮源, 同时微生物参与土壤有机质的分解等生化过程, 梯田土壤微生物数量与养分含量有密切的关系。元阳梯田核心区稻田依山而建, 分布在海拔 1 450~1 850 m 的山坡, 海拔 1 450 m 和 1 500 m 的稻田建成时间要早于 1 700 m 和 1 800 m 的稻田^[32]。元阳梯田不同海拔稻田土壤养分含量的差异对土壤微生物数量产生明显影响。元阳梯田低海拔 (1 450、1 500 m) 的稻田土壤微生物数量多于高海拔的 (1 700、1 800 m) 稻田。

[参考文献]

[1] 陈蝶, 卫伟, 陈利顶. 梯田景观的历史分布及典型国际案例分析[J]. 应用生态学报, 2017, 28(2): 689. DOI: 10.13287/j.1001-9332.201702.010.

[2] 侯惠珺, 罗丹, 赵鸣. 基于生态恢复和文化回归的梯田景观格局重建——以菲律宾科迪勒拉高山水稻梯田景观复兴为例[J]. 生态学报, 2016, 36(1): 148. DOI: 10.5846/stxb201502060300.

[3] 缪建群, 王志强, 黄国勤, 等. 崇义客家梯田生态系统服务功能[J]. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1642. DOI: 10.13287/j.1001-9332.201705.015.

- [4] 张丹,刘宏斌,马忠明,等.残膜对农田土壤养分含量及微生物特征的影响[J].中国农业科学,2017,50(2):310. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2017.02.010.
- [5] 杨敏芳,韩新忠,卞新民,等.耕作措施与秸秆还田对稻麦两熟制农田土壤养分、微生物生物量及酶活性的影响[J].水土保持学报,2013,27(2):272. DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2013.02.044.
- [6] 王传杰,肖婧,蔡岸冬,等.不同气候与施肥条件下农田土壤微生物生物量特征与容量分析[J].中国农业科学,2017,50(6):1067. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2017.06.008.
- [7] 江叶枫,钟珊,郭熙,等.近30年余干县耕地土壤碳氮比时空变异特征及其影响因素[J].环境科学,2018,39(3):1386. DOI: 10.13227/j.hjxx.201706186.
- [8] 贺纪正,王军涛.土壤微生物群落构建理论与时空演变特征[J].生态学报,2015,35(20):6575. DOI: 10.5846/stxb.201506061143.
- [9] 殷彩云,王家强,肖春鸣,等.新疆滴灌棉田土壤速效养分时空分布特征[J].西北农业学报,2016,25(10):1575. DOI: 10.7606/j.issn.1004-1389.2016.10.023.
- [10] 于洋,赵业婷,常庆瑞.渭北台塬区耕地土壤速效养分时空变异特征[J].土壤学报,2015,52(6):1251. DOI: 10.11766/trxb201412060625.
- [11] 张桂玲.秸秆和生草覆盖对桃园土壤养分含量、微生物数量及土壤酶活性的影响[J].植物生态学报,2011,35(12):1236. DOI: 10.3724/SP.J.1258.2011.01236.
- [12] 何芳兰,郭春秀,金红喜,等.民勤绿洲边缘沙丘生物土壤结皮发育对浅层土壤质地、养分含量及微生物数量的影响[J].生态学报,2017,37(18):6064. DOI: 10.5846/stxb201606281277.
- [13] 翟婉婉,李雪萍,谢勇,等.云南水稻地方品种月亮谷的群体多样性分析[J].植物遗传资源学报,2016,17(3):423. DOI: 10.13430/j.cnki.jpgr.2016.03.004.
- [14] 何永美,湛方栋,吴炯,等.UV-B辐射对元阳梯田水稻根系LMWOAs分泌量和根际微生物数量的影响[J].农业环境科学学报,2016,35(4):613. DOI: 10.11654/jaes.2016.04.001.
- [15] 文波龙,任国,张乃明.云南元阳哈尼梯田土壤养分垂直变异特征研究[J].云南农业大学学报(自然科学),2009,24(1):78. DOI: 10.16211/j.issn.1004-390x(n).2009.01.007.
- [16] 角媛梅,张贵,王宇,等.哈尼梯田景观地表水营养物质的时空变化[J].生态学杂志,2009,28(9):1787. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2009.0330.
- [17] 姚敏,崔保山.哈尼梯田湿地生态系统的垂直特征[J].生态学报,2006,26(7):2115. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2006.07.009.
- [18] 白艳莹,闵庆文,李静.哈尼梯田生态系统森林土壤水源涵养功能分析[J].水土保持研究,2016(2):166. DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2016.02.032.
- [19] 段兴凤,宋维峰,李健,等.云南省元阳梯田水源区森林土壤入渗特性研究[J].水土保持通报,2011,31(4):47. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2011.04.030.
- [20] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2005.
- [21] 李振高,骆永明,滕应.土壤与环境微生物研究法[M].北京:科学出版社,2008.
- [22] 湛方栋,陆引罡,关国经,等.烤烟根际微生物群落结构及其动态变化的研究[J].土壤学报,2005,42(3):488. DOI: 10.11766/trxb200406090321.
- [23] 陈桂香,王维奇,曾从盛.联合梯田不同海拔稻田土壤养分及其生态化学计量比分布特征[J].福建师范大学学报(自然科学版),2017,33(1):60. DOI: 10.12046/j.issn.1000-5277.2017.01.010.
- [24] 王忠华.转Bt基因水稻对土壤微生态系统的潜在影响[J].应用生态学报,2005,16(12):2469. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2005.0373.
- [25] 史刚荣.植物根系分泌物的生态效应[J].生态学杂志,2004,23(1):97. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2004.0021.
- [26] TOURNA M, FREITAG T E, NICOL G W, et al. Growth, activity and temperature responses of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in soil microcosms[J]. Environmental Microbiology, 2008, 10(5): 1357. DOI: 10.1111/j.1462-2920.2007.01563.x.
- [27] GOFREDI S K, WILPISZESKI R, LEE R, et al. Temporal evolution of methane cycling and phylogenetic diversity of archaea in sediments from a deep-sea whale-fall in Monterey Canyon, California[J]. The International Society for Microbial Ecology Journal, 2008, 2(2): 204. DOI: 10.1038/ismej.2007.103.
- [28] YERGEAU E, KANG S H, HE Z L, et al. Functional microarray analysis of nitrogen and carbon cycling genes across an Antarctic latitudinal transect[J]. The International Society for Microbial Ecology Journal, 2007, 1(2): 163. DOI: 10.1038/ismej.2007.24.
- [29] JIN X C, JIANG X, YAO Y, et al. Effects of organisms on the release of phosphorus at the interface between sediment and water[J]. Water Environment Research, 2006, 78(12): 2405. DOI: 10.2175/106143006x95410.
- [30] MOHANTY S R, BODELIER P L, CONRAD R. Effect of temperature on composition of the methanotrophic community in rice field and forest soil[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2007, 62(1): 24. DOI: 10.1111/j.1574-6941.2007.00370.x.
- [31] KNIEF C, VANITCHUNG S, HARVEYN W, et al. Diversity of methanotrophic bacteria in tropical upland soils under different land uses[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005, 71(7): 3826. DOI: 10.1128/AEM.71.7.3826-3831.2005.
- [32] 侯甬坚.红河哈尼梯田形成史调查和推测[J].南开学报(哲学社会科学版),2007(3):53. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4667.2007.03.007.

责任编辑:何馨成