

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201701025

引文格式: 周龙武, 黄玉清, 王新桂, 等. 桂林会仙喀斯特湿地芦苇群落土壤微生物数量动态分析 [J]. 广西植物, 2017, 37(6):685–693
ZHOU LW, HUANG YQ, WANG XG, et al. Dynamic changes of soil microbe quantity in reed vegetation of Huixian Karst Wetland, Guilin, China [J].
Guihaia, 2017, 37(6):685–693

桂林会仙喀斯特湿地芦苇群落土壤微生物数量动态分析

周龙武, 黄玉清, 王新桂, 徐广平*, 孙英杰, 张德楠, 姚月锋, 曾丹娟

(广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室, 广西壮族自治区 广西植物研究所, 广西 桂林 541006)
中 国 科 学 院

摘 要: 以广西桂林会仙喀斯特湿地典型芦苇植物群落为研究对象, 于春、夏、秋、冬四个季节分别采集 0~10 cm, 10~20 cm 和 20~30 cm 不同层次的土壤样品, 分析根际微生物与非根际微生物的数量特征及季节动态变化特点, 探讨微生物数量对水热季节变化的响应规律。结果表明: 不同季节的根际微生物与非根际微生物组成, 均以细菌占绝对优势; 微生物数量分布大小顺序为细菌>放线菌>真菌, 细菌最高比例为 96.62%, 放线菌最高比例为 35.38%, 真菌的比例较低, 最高仅为 0.30%。细菌、真菌和放线菌的垂直变化明显, 均随着土层的增加而呈现递减的趋势。不同土壤层次根际微生物与非根际微生物的季节变化一致, 细菌数量表现为夏季>秋季>春季>冬季, 真菌数量表现为秋季>夏季>春季>冬季, 放线菌数量表现为秋季>春季>夏季>冬季; 细菌、放线菌、真菌的最大值分别为 2.70×10^7 、 1.92×10^6 、 3.35×10^4 cfu · g⁻¹, 土壤微生物数量与土壤有机碳、全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷、速效钾等呈显著正相关。芦苇植物群落根际土壤微生物呈现出一定的根际效应, 并与微生物数量、土壤深度、月平均降雨量和月平均气温变化等有关, 而在冬季的根际效应则表现不显著。土壤养分含量是调节会仙喀斯特湿地土壤微生物数量变化的一个主要因素。

关键词: 喀斯特湿地, 细菌, 真菌, 放线菌, 根际效应

中图分类号: Q938.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2017)06-0685-10

Dynamic changes of soil microbe quantity in reed vegetation of Huixian Karst Wetland, Guilin, China

ZHOU Long-Wu, HUANG Yu-Qing, WANG Xin-Gui, XU Guang-Ping*,
SUN Ying-Jie, ZHANG De-Nan, YAO Yue-Feng, ZENG Dan-Juan

(Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain, Guangxi Institute of Botany,
Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences, Guilin 541006, Guangxi, China)

Abstract: Reed is one of the typical dominant plant communities in Huixian Karst Wetland. In order to investigate the dynamic distribution characteristics of soil microbes of reed plant community in Huixian Karst Wetland and to explore the

收稿日期: 2017-01-30 修回日期: 2017-03-28

基金项目: 广西林业科技项目(桂林科字[2013]第14号); 广西科技攻关计划项目(桂科攻14124004-3-5, 桂科重1598014-3); 广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室基金(16-380-32); 广西植物研究所基本业务费项目(桂植业16005); 国家自然科学基金(41361057, 31360202); 岩溶动力学重点实验室基金(KDL2011-09); 广西自然科学基金(2013GXNSFEA053001) [Supported by Guangxi Forestry Science and Technology Project ([2013]14); the Science and Technology Program of Guangxi (14124004-3-5, 1598014-3); Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain (16-380-32); the Fundamental Research Fund of Guangxi Institute of Botany (16005); the National Natural Science Foundation of China (41361057, 31360202); the Karst Dynamics Laboratory, MLR and GZAR (KDL2011-09); the Natural Science Foundation of Guangxi (2013GXNSFEA053001)].

作者简介: 周龙武(1989-), 男, 广西河池人, 硕士, 研究实习员, 主要从事微生物学的研究, (E-mail) longzhouwu@163.com。

* **通信作者:** 徐广平, 博士, 副研究员, 主要从事生态学的研究, (E-mail) xugpgau@163.com。

response mechanism of soil microorganism on water and thermal seasonal change, different levels of soil samples (0–10, 10–20 and 20–30 cm) were collected, and the composition and distribution of bacteria, fungi and actinomycetes between rhizosphere and non-rhizosphere were studied during spring, summer, autumn and winter in reed vegetation, respectively. The results showed that the quantities of rhizosphere and non-rhizosphere microorganism were different at different seasons. Among all microbes, bacteria were the most numerous followed by actinomycetes, with fungi the least numerous. The highest proportion of bacteria was 96.62%, actinomycetes was 35.38%, and fungi was very small. The soil vertical change of bacteria, fungi and actinomycetes were obviously. The microbial quantity decreased with the increasing of soil depth on the whole. The seasonal change of different soil levels of rhizosphere microorganism and non-rhizosphere microorganism were consistent in our study plot. The results indicated that the bacteria quantity in the same soil layer followed the way of summer > autumn > spring > winter, but the fungi quantity showed autumn > summer > spring > winter, the actinomycetes quantity was in an order of autumn > spring > summer > winter. Meanwhile, the maximum values of bacteria, actinomycetes and fungi were 2.70×10^7 , 1.92×10^6 and 3.35×10^4 cfu · g⁻¹ relatively. Microorganism in the soil of reed plant community had obvious rhizosphere effect to some extent. The microorganism and soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, available nitrogen, available phosphorus and available potassium had a significant positive correlation. The rhizosphere effect of microorganism associated with microbial type, soil depth, monthly average rainfall and temperature changes, and it was non-significantly in winter as a whole. It had significant seasonal variations as well. The content of soil nutrition may be a major factor for the change of soil microbial quantity in Huixian Karst Wetland. Meanwhile, the dynamic changes of the number of soil microorganism may reveal the environmental effects of wetlands. The scientific data for the wetland sustainable management policy would be suggested for Huixian Karst Wetland.

Key words: karst wetland, bacteria, fungi, actinomycetes, rhizosphere effect

湿地被誉为“地球之肾”,因其具有巨大的环境功能和效益而被世界各国广泛关注(雷昆和张明祥, 2005)。芦苇(*Phragmites australis*)作为湿地环境的重要组成部分,具有净化水体、吸收温室气体和维持湿地生态系统物种多样性等独特功能(Engloner, 2009)。土壤微生物是湿地生态系统的重要组成部分,不仅参与湿地生态系统的物质循环和能量流动,还对生物间的相互作用等过程都有影响(刘银银等, 2013),并与土壤的结构、通气性、水分状况、养分状况等有密切的关系,湿地土壤微生物的数量动态变化与环境相关,而一般植物根际土壤微生物尤为丰富。

前人对湿地芦苇植物根际微生物与非根际微生物的研究已有相关报道,段俊英等(1985)研究了不同生态条件下芦苇根际微生物及其生物学活性,发现无论是干旱型芦苇田、季节性积水芦苇田还是长期性积水芦苇田,都是根际细菌的数量多于非根际细菌,而干旱型芦苇田的细菌数量是三种田型最多的。丁浩等(2007)研究上海梦清园湿地芦苇根际微生物特性,发现根际细菌、真菌和放线菌的数量均比非根际多。武琳慧等(2014)研究内蒙古乌梁素海湿地过渡带土壤微生物类群数量与分布,发现不同群落下土壤微生物数量和分布明显不同,而且优

势类群明显。张晓红等(2015)研究新疆艾比湖湿地芦苇植物根际放线菌在春、夏、秋三季的多样性及其环境响应,发现不同植物根际、不同季节的放线菌多样性存在明显差异。由于土壤类型及理化性质的差异,不同微生物数量的季节动态变化,在不同生态系统可能会有不同的表现,尤其植物根际效应可能会因环境水热变化而存在不同。

桂林会仙喀斯特湿地因受各种人为活动的影响和破坏,典型湿地优势植物芦苇群落数量减少,呈现出逐渐演替为其它植物群落的发展趋势,可能会进一步影响到湿地生态系统的物质循环等。目前已有的研究主要集中在湿地分类(马祖陆等, 2009)、遥感监测(蔡德所等, 2009)、沉积物元素变化(沈德福等, 2010)、水葫芦入侵(徐广平等, 2012)和土壤养分含量(靳振江等, 2014)等方面,而芦苇植物群落土壤细菌、真菌和放线菌的季节变化还缺乏系统研究,土壤微生物数量对水热变化的季节响应如何?是否表现有潜在的微生物根际效应?本研究利用稀释平板计数法对芦苇群落土壤根际微生物与非根际微生物的季节变化进行比较研究,通过与土壤理化性质的相关性分析,结合月平均降雨量和月平均气温的变化特点,阐明土壤主要三大类型微生物数量在土壤层次的分布和对季

节变化的响应,为中低海拔喀斯特湿地生态系统功能演替、植被生态修复提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

会仙岩溶湿地位于桂林市临桂县会仙镇,东至雁山区,西至四塘乡,地理坐标为 $25^{\circ}01'30''\sim 25^{\circ}11'15''$ N, $110^{\circ}08'15''\sim 110^{\circ}18'00''$ E,海拔 150~160 m,总面积约 120 km²,是以草本沼泽和湖泊为主的喀斯特湿地,是国内为数不多的中低海拔大型喀斯特湿地之一(吴应科等,2006)。该区属亚热带季风气候区,年均气温 16.5~20.5℃,极高温达 38.80℃,极低温度为 -3.30℃,年均降雨量为 1 890.4 mm。降雨时空分布不均,多集中在每年的 3~8 月,形成了春夏雨多而集中,秋冬少雨干旱的特点。土壤以红黄壤和红壤为主,集中分布于洼地、平原和缓坡,山区土壤层薄甚至基岩裸露(蔡德所和马祖陆,2008)。湿地植被以挺水植被和沉水植被为主,植物种类较多,且生长茂盛,盖度为 80%~95%,主要建群种有芦苇、华克拉莎(*Cladium chinense*)、五刺金鱼藻(*Ceratophyllum demersum* var. *oryzelorum*)、石龙尾(*Limnophila sessiliflora*)等(韦峰,2010)。研究区采样期间的月平均气温与平均降雨量详见图 1。

1.2 研究方法

在野外详细踏查的基础上,以会仙喀斯特湿地典型芦苇植物群落为研究对象,于春季(2014 年 3 月和 4 月)、夏季(2014 年 6 月和 7 月)、秋季(2014 年 10 月和 11 月)和冬季(2014 年 12 月,2015 年 1 月)每月中下旬采样一次,选择三块约 20 m×20 m 的地块采集土壤样品,按照 S 型方法在各样地中选取 5 个代表性样点,按 0~10 cm(表层),10~20 cm(中层)和 20~30 cm(下层)3 个层次用土壤取样器分层取土,同层土壤混匀为 1 个土样。采用抖根法采集植物的根际土壤(Veneklaas et al,2003),将植株根系挖出,轻轻抖落大块不含根系的土壤作为非根际土(S),然后用刷子收集与根系紧密结合的土壤作为根际土(R),取根际土尽量减少对根系的损害,去除混杂于根际土中的根系、石块等杂物。将每个样地采集的土壤样品,装在全灭菌自封袋中,迅速置于密封冰袋容器中冷藏后带回实验室于 4℃ 冰箱中保存,然后备 2 份处理(1 份鲜样,1 份风干样)。鲜样用于土壤微生物数量指标的分析;其余样品常规

处理,用于土壤理化性质的分析。

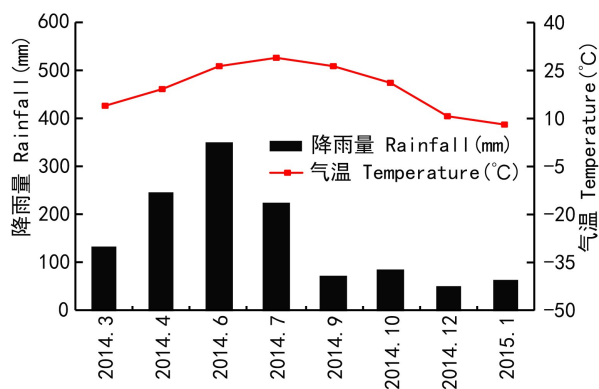


图 1 月均气温与月均降雨量变化特点

Fig. 1 Seasonal variation characteristics of average monthly temperature and average monthly rainfall

土壤微生物数量的测定按照《土壤微生物分析方法手册》(许光辉和郑洪元,1986)进行,通过稀释平板计数法进行细菌、放线菌、真菌数量的测定,培养基分别为牛肉膏蛋白胨培养基,改良高氏 1 号(苯酚 500 mg·L⁻¹)培养基,马丁(Martin)孟加拉红~链霉素(链霉素 30 mg·L⁻¹)培养基。结果计算方法以每克样品的菌数=同一稀释度几次重复的菌落平均数×稀释倍数。土壤含水量测定采用烘干法进行测定;pH 值用酸度计测定(水土质量比为 2.5:1);土壤有机碳(SOC)用总有机碳 TOC 仪测定(岛津 5000A,日本);全氮(TN)用 Vario ELIII 元素分析仪测定(德国);全磷(TP)用浓硫酸-高氯酸消煮,钼锑抗比色法(Agilent 8453 紫外-可见分光光度计,美国);全钾(TK)用硫酸-高氯酸消煮,火焰光度法;速效氮(AN)用碱解扩散法;速效磷(AP)用碳酸氢钠浸提,钼锑抗比色法;速效钾(AK)用火焰光度法(鲍士旦,2000)。

1.3 数据分析

数据处理及图表绘制运用 Excel 2007 软件,描述性统计分析运用 SPSS 19.0 软件,多重比较采用单因子(One-way ANOVA)进行方差分析,两两比较采用独立样本 T 检验进行分析,相关性分析采用双变量相关分析(显著性水平设定为 $P<0.05$,极显著水平设定为 $P<0.01$)。

2 结果与分析

2.1 不同层次土壤理化性质的变化

从表 1 看出,芦苇群落土壤不同层次的土壤有

表 1 样地土壤基本理化性质
Table 1 Soil basic physical and chemical properties of sample plot

土层 Soil layer (cm)	pH	含水量 Water content (%)	有机碳 SOC (g · kg ⁻¹)	全氮 TN (g · kg ⁻¹)	全磷 TP (g · kg ⁻¹)	全钾 TK (g · kg ⁻¹)	速效氮 AN (mg · g ⁻¹)	速效磷 AP (mg · g ⁻¹)	速效钾 AK (mg · g ⁻¹)
0~10	7.12a	33.08a	23.62a	2.93a	0.56a	16.36a	188.27a	3.93a	309.99a
10~20	7.28a	25.76b	20.38b	2.05b	0.33b	11.34b	126.89b	3.10b	228.92b
20~30	7.39a	18.81c	14.38c	1.50c	0.24c	7.78c	88.62c	2.23c	152.28c

注：同列不同小写字母表示显著差异 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters in the same column meant significant differences ($P<0.05$ level).

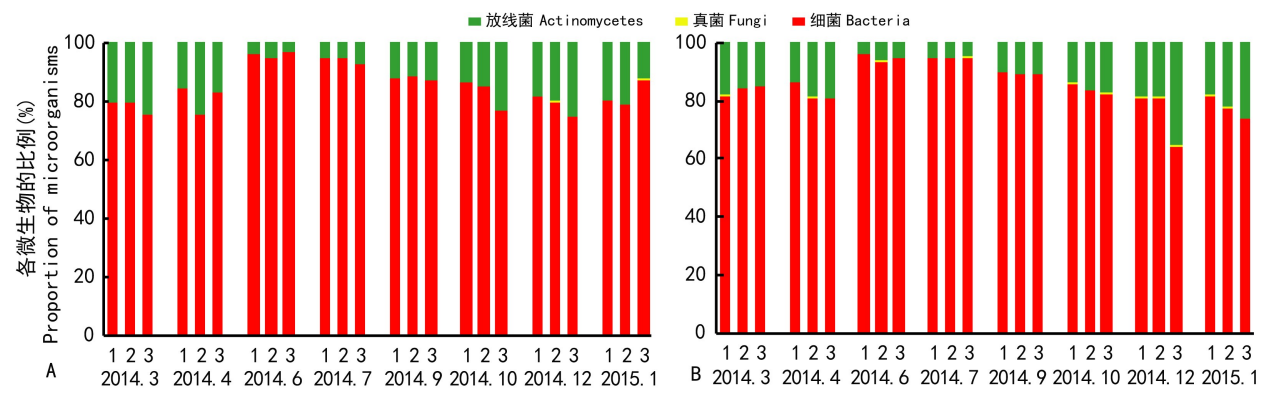


图 2 微生物数量比例 A. 根际微生物; B. 非根际微生物; 1. 0~10 cm 土层; 2. 10~20 cm 土层; 3. 20~30 cm 土层。
Fig. 2 Proportion of microbial quantity A. Rhizosphere; B. Non-rhizosphere; 1. 0~10 cm soil layer; 2. 10~20 cm soil layer; 3. 20~30 cm soil layer.

机碳 (SOC)、全氮 (TN)、全磷 (TP)、全钾 (TK) 等指标表现了一定的差异性,土壤 pH 随着土壤深度的增加而增加,但差异不显著;而土壤含水量、有机碳 (SOC)、全氮 (TN)、全磷 (TP)、全钾 (TK)、速效氮 (AN)、速效磷 (AP)、速效钾 (AK) 等指标都随着土壤深度增加而减小,各土层之间的差异均达到显著性水平。

2.2 土壤微生物总数变化

从图 2 可以看出,根际微生物与非根际微生物的层次分布及季节变化趋势基本一致,微生物组成均是细菌占主导地位,其次为放线菌,最后为真菌,各个土层、各个季节真菌的比例都比较低。根际细菌在冬季土壤 20~30 cm 比例最低 (74.5%),夏季土壤 20~30 cm 最高 (96.62%),而根际真菌在夏季土壤 20~30 cm 最低 (0.04%),冬季土壤 0~10 cm 最高 (0.28%),根际放线菌在夏季土壤 20~30 cm 最低 (3.33%),冬季土壤 20~30 cm 最高 (25.28%);非根际细菌在冬季土壤 20~30 cm 最低 (64.32%),夏季

土壤 0~10 cm 最高 (96.23%),非根际真菌在夏季土壤 0~10 cm 最低 (0.06%),冬季土壤 0~10 cm 和 20~30 cm 土壤最高 (0.30%),非根际放线菌在夏季土壤 0~10 cm 最低 (3.71%),冬季土壤 20~30 cm 最高 (35.38%)。根际微生物与非根际微生物的季节变化有所差异,在不同层次之间的大小趋势也不完全一致。

2.3 土壤细菌的季节变化

从图 3 可以看出,不同季节的根际细菌与非根际细菌的层次变化趋势类似,均表现为表层>中层>下层;不同深度土壤的根际细菌与非根际细菌的季节动态变化特点一致,均表现为夏季>秋季>春季>冬季。根际细菌的最大值为 2.70×10^7 cfu · g⁻¹ (6 月表层),最小值为 9.33×10^5 cfu · g⁻¹ (12 月深层),非根际细菌的最大值为 2.10×10^7 cfu · g⁻¹ (6 月表层),最小值为 6.0×10^5 cfu · g⁻¹ (12 月深层)。表层土壤,细菌在 3 月、4 月和 9 月根际效应显著 ($P<0.05$),在 6 月、7 月和 10 月根际效应极显著 ($P<0.01$, $P<$

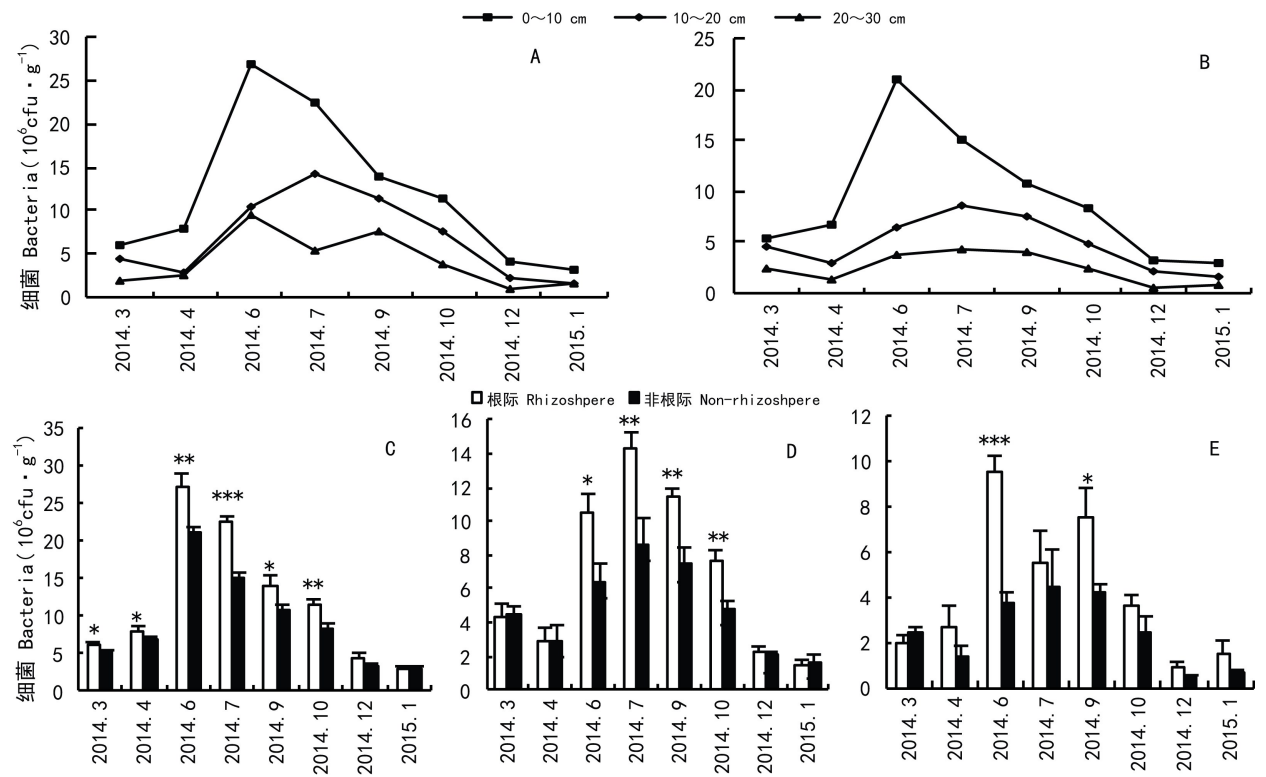


图3 细菌变化特点 A. 根际; B. 非根际; C. 0~10 cm 土层; D. 10~20 cm 土层; E. 20~30 cm 土层。
* 表示显著性水平 ($P<0.05$); ** 表示显著性水平 ($P<0.01$); *** 表示显著性水平 ($P<0.001$)。下同。

Fig. 3 Variations of bacteria in different months A. Rhizosphere; B. Non-rhizosphere; C. 0–10 cm soil layer; D. 10–20 cm soil layer; E. 20–30 cm soil layer. * represents significant differences ($P<0.05$); ** represents significant differences ($P<0.01$); *** represents significant differences ($P<0.001$). The same below.

0.001),在1月和12月根际效应不显著;中层土壤,细菌在6月根际效应显著($P<0.05$),在7月、9月和10月根际效应极显著($P<0.01$),在1月和12月根际效应不显著;下层土壤,细菌在9月根际效应显著($P<0.05$),在6月根际效应极显著($P<0.001$),在其他月份根际效应不显著。

2.4 土壤真菌的季节变化

从图4可以看出,根际真菌的最大值为 3.35×10^4 cfu · g⁻¹(10月表层),最小值为 1.93×10^3 cfu · g⁻¹(1月下层),非根际真菌的最大值为 2.38×10^4 cfu · g⁻¹(10月表层),最小值为 1.67×10^3 cfu · g⁻¹(1月下层)。随土壤深度增加,不同季节的根际真菌与非根际真菌均逐渐减小;不同深度土壤的根际真菌与非根际真菌的季节动态均表现为秋季>夏季>春季>冬季。表层土壤,真菌在1月和12月根际效应不显著,在3月根际效应显著($P<0.05$),在其他月份根际效应极显著($P<0.01$, $P<0.001$);中层土壤,真菌在6月和7月根际效应显著($P<0.05$),在4

月根际效应极显著($P<0.01$),在其他月份根际效应不显著;下层土壤,真菌仅在10月根际效应显著($P<0.05$)。

2.5 土壤放线菌的季节变化

从图5可以看出,与细菌,真菌相一致,随土壤深度增加,不同季节的根际放线菌与非根际放线菌均表现为表层>中层>下层;不同深度土壤的根际放线菌与非根际放线菌的季节特点也趋同,均表现为秋季>春季>夏季>冬季。根际放线菌的最大值为 1.92×10^6 cfu · g⁻¹(9月表层),最小值为 2.13×10^5 cfu · g⁻¹(1月下层);非根际放线菌的最大值为 1.33×10^6 cfu · g⁻¹(10月表层),最小值为 2.00×10^5 cfu · g⁻¹(6月下层)。表层土壤,放线菌在1月根际效应不显著,在6月和7月根际效应显著($P<0.05$),在其他月份根际效应极显著($P<0.01$, $P<0.001$);中层土壤,放线菌在1月、6月和12月根际效应不显著,在4月根际效应显著($P<0.05$),在其他月份根际效应极显著($P<0.01$);下层土壤,放线菌在6月和7

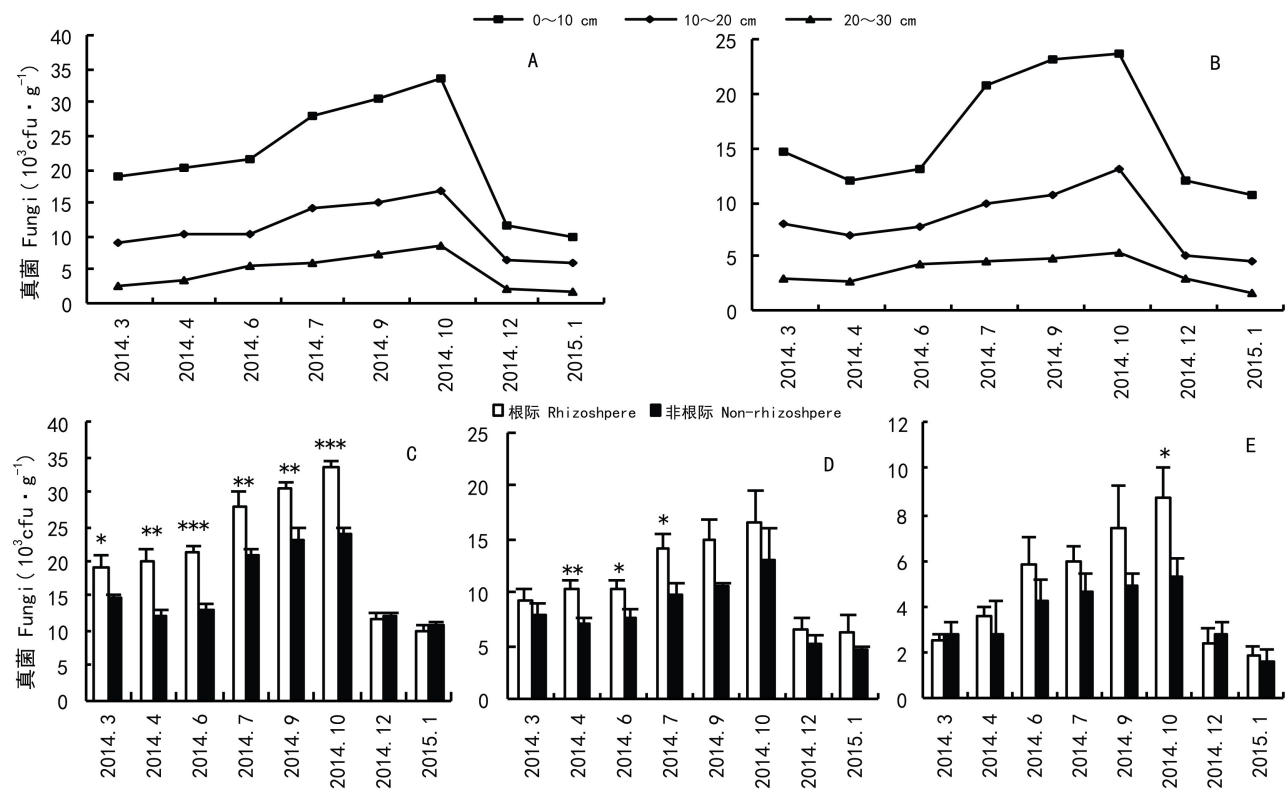


图 4 真菌变化特点
Fig. 4 Variations of fungi in different months

月根际效应显著 ($P<0.05$), 在 9 月和 10 月根际效应极显著 ($P<0.01, P<0.001$), 在其他月份根际效应不显著。

2.6 土壤微生物与土壤理化性质的相关性

土壤微生物数量与土壤理化性质表现出不同程度的相关性 (表 2)。除与 pH 值负相关之外, 差异不显著 ($P>0.05$), 微生物数量与土壤其它元素含量均呈显著正相关 ($P<0.01$), 相关系数为 0.817 ~ 0.983, 均达到极显著性水平。说明土壤养分含量是调节湿地生态系统土壤微生物数量变化的一个因素。会仙湿地土壤层次 0~30 cm 的 pH 差异不显著, 这可能引起微生物数量与 pH 也没有相关性。

3 讨论与结论

本研究结果表明, 会仙湿地芦苇植物群落土壤根际微生物和非根际微生物随着土层的增加而减少, 这与苏芳莉等 (2012) 的研究结果一致, 其河口芦苇湿地土壤微生物数量变化表现为在芦苇拔节期高, 细菌、真菌和放线菌数量均为 0~20 cm > 20~40

cm > 40~60 cm, 而赵先丽等 (2008) 的研究表明, 盘锦芦苇湿地微生物数量表现为 10~20 cm > 0~10 cm > 20~30 cm, 这说明不同类型湿地, 微生物随土壤深度的分布变化并不完全一致, 这可能与不同湿地土壤性质差异有关。与其他研究比较, 本研究中会仙喀斯特湿地土壤真菌的数量还不是很低, 反映了土壤真菌对土壤水分和氧气含量较敏感的特性, 这主要是因为会仙喀斯特湿地芦苇群落常年处于非淹水状态, 水分含量不是很饱和, 土壤的通气性较好。土壤理化性质是土壤肥力的重要指标, 而土壤能够为微生物提供生命所需的水, 碳源, 氮源和生长因子等, 会仙湿地的土壤养分随着土层的增加而减少, 而其他湿地土壤养分并不一定全部是表层的最高, 这也反映了土壤微生物在不同湿地土壤中分布的不均一性。由于土壤微生物对生态环境变化比较敏感, 因此土壤主要三大类型微生物的数量动态变化也可以作为表征喀斯特湿地土壤质量变化的指标之一。

本研究中, 会仙湿地月平均气温与平均降雨量季节特点明显, 夏季的气温与降雨量均为最高, 冬季

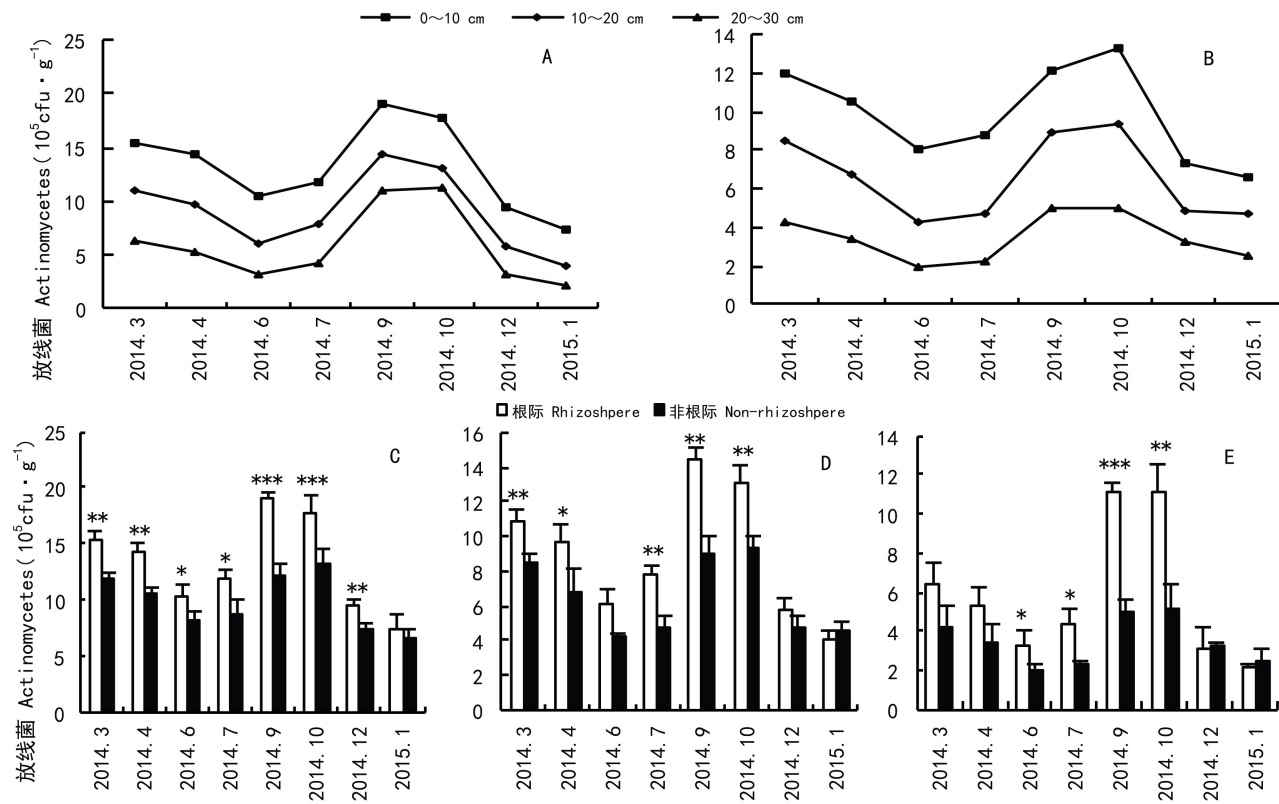


图 5 放线菌变化特点
Fig. 5 Variations of actinomycetes in different months

的气温与降雨量均为最低,春季的降雨量比秋季多,但是气温比秋季低。月均降雨量 6 月份最高,12 月份最低;月均气温 7 月份最高,1 月份最低。该研究显示,会仙湿地芦苇植物群落土壤根际微生物与非根际微生物的季节响应趋势一致,季节水热变化对土壤微生物的动态有重要影响,但不同微生物数量各自趋势并不一致,细菌表现为夏季>秋季>春季>冬季,真菌表现为秋季>夏季>春季>冬季,放线菌则表现为秋季>春季>夏季>冬季。冬季温度过低,微生物生长代谢受抑制,所以土壤主要三大类型微生物在冬季的数量最少;夏季的温度是细菌的最适生长温度,所以细菌在夏季的数量最多,其次为秋季,再到春季;秋季的温度适宜真菌与放线菌生长,所以真菌与放线菌在秋季的数量比其他季节多;夏季比春季降雨多,降雨量可以影响土壤含水量(Conant et al, 2004),真菌随着土壤含水量的增加而增加,放线菌与土壤含水量关系不大(胡容平等,2010),所以真菌在夏季比在春季多,放线菌在春季比在夏季多。本研究会仙喀斯特湿地从 4 月上旬气温逐渐升

高,微生物开始生长繁殖,夏季水热条件较适宜,是植物生长旺盛的季节,微生物数量迅速增加,进入冬季后开始有所下降,这反映出典型芦苇植物群落土壤微生物的生长状况与季节密切相关,即季节变化对会仙喀斯特湿地土壤微生物数量的动态变化有重要影响。

在自然环境中,不同植物根系周围微生物的种类和数量存在差别,其原因是不同植物的根系周围有着自身特有的分泌物和其他的有机物质(Miethling et al, 2000)。雷旭等(2015)对美人蕉、梭鱼草和再力花 3 种植物根际的微生物数量研究表明,植物种类能影响根际微生物的种类和数量分布,每个种类的植物都存在一些种属相同但是数量不同的菌属,这些菌属对环境条件变化的适用能力较强,因此在湿地系统根系周围一直稳定的存在。我们会仙湿地典型芦苇植物根际与非根际微生物的分布研究发现,无论是根际土壤还是非根际土壤,微生物数量分布均为细菌>放线菌>真菌,这与丁浩等(2007)在上海市梦清园湿地芦苇植物根际与非

表 2 微生物数量与土壤养分相关性分析

Table 2 Correlations between soil microorganisms and characteristics of soils

微生物种类 Microbiological species	土壤养分 Soil nutrients								
	pH	含水量 Water content	有机碳 SOC	全氮 TN	全磷 TP	全钾 TK	速效氮 AN	速效磷 AP	速效钾 AK
根际细菌 Rhizosphere bacteria	-0.300	0.917 **	0.867 **	0.867 **	0.850 **	0.833 **	0.917 **	0.900 **	0.917 **
根际真菌 Rhizosphere fungi	-0.433	0.933 **	0.883 **	0.933 **	0.917 **	0.900 **	0.983 **	0.833 **	0.950 **
根际放线菌 Rhizosphere actinomyteces	-0.550	0.867 **	0.817 **	0.967 **	0.883 **	0.833 **	0.900 **	0.817 **	0.917 **
非根际细菌 Non-rhizosphere bacteria	-0.500	0.950 **	0.900 **	0.850 **	0.883 **	0.883 **	0.917 **	0.917 **	0.917 **
非根际真菌 Non-rhizosphere fungi	-0.250	0.983 **	0.933 **	0.883 **	0.900 **	0.967 **	0.833 **	0.900 **	0.983 **
非根际放线菌 Non-rhizosphere actinomyteces	-0.385	0.929 **	0.929 **	0.954 **	0.887 **	0.979 **	0.912 **	0.870 **	0.979 **

注：* * 表示 0.01 显著性水平 ($P<0.01$)。
Note: * * represent significant difference ($P<0.01$).

根际微生物的研究结果一致,而项学敏等(2004)对大连市金州区的天然湿地芦苇植物根际与非根际微生物的特性研究得到的结果为细菌>真菌>放线菌,说明相同的植物在不同区域的湿地,微生物的分布也是不一致的,这与土壤理化性质,气象环境因子等都有关。本研究结果中,由于细菌占微生物总数的绝大多数,会仙湿地芦苇群落土壤微生物总数的动态变化规律与细菌数量变化相一致,环境中物质的分解和转化主要依靠细菌完成。一般细菌和放线菌适宜在中性偏碱性环境中生长,大多数真菌则适宜在中性偏酸的环境中生存(陈为峰和史衍玺,2010),而本研究会仙喀斯特湿地我们取样点的土壤呈偏碱性,这可能也是真菌数量相对于细菌和放线菌数量较少的一个原因。土壤层次(0~30 cm)的pH 差异不显著,并且 pH 与微生物数量呈负相关(差异不显著, $P>0.05$),这与前人报道相类似(高庭艳等,2008),但是否与会仙喀斯特湿地土壤 pH 的大小范围有关,还有待进一步深入探讨。

丁浩等(2007)的结果表明,根际微生物的数量均比非根际多,这与本研究结果不尽相同,我们发现,微生物的根际效应与微生物不同数量、土壤深度及气温和降雨量等都有关系,会仙湿地芦苇植物根际微生物呈现出根际效应,但不同微生物在不同土层、不同季节和不同月份的表现规律不完全一致。0~10 cm 层土壤,细菌、真菌、放线菌都是在冬季(12 月和 1 月)基本没有表现出根际效应;10~20 cm 层土

壤,细菌在夏季(6 月和 7 月)和秋季(9 月和 10 月)根际效应显著,真菌在春季(4 月)和夏季(6 月和 7 月)根际效应显著,放线菌在春季(4 月)、夏季(6 月和 7 月)和秋季(9 月和 10 月)根际效应显著;20~30 cm 层土壤,细菌在夏季(6 月)和秋季(9 月)根际效应显著,真菌仅在秋季(10 月)根际效应显著,放线菌夏季(6 月和 7 月)和秋季(9 月和 10 月)根际效应显著。这间接反映了在中低海拔的喀斯特湿地,土壤微生物数量对月平均气温和月平均降雨量变化响应的季节性和土层的差异性。表层土壤微生物数量相对集中,这是因为表层土壤中土壤有机碳含量丰富,土壤结构疏松,给微生物活动提供良好的通气环境,同时,表层土壤与空气热交换相对较快,其土壤热量状况比下层较高,有利于微生物的生长。

本研究桂林会仙喀斯特湿地典型芦苇植物群落土壤微生物数量有着不同的季节变化特点,表现出明显的根际效应,在表层土壤(0~10 cm)尤为明显,并且与土壤养分含量、月平均气温和月平均降雨量等有关。相对而言,雨季(5—10 月)比旱季(11 月至次年 4 月)的影响作用更大,土壤养分含量是调节会仙喀斯特湿地土壤微生物数量变化的一个主要因素。在桂林会仙喀斯特国家湿地公园保护与工程恢复中,建议部分区域需要结合植被群落、季节变化、土壤养分以及微生物数量特点等相关因素,积极采取植被-微生物联合生态修复措施,增强芦苇优势植物的根际效应,促进植物生长,以达到生态功能

恢复和环境美化的作用。而不同植物群落类型土壤的微生物数量特征、根际效应以及土壤微生物功能多样性等,传统方法在土壤微生物群落培养时受到一定的限制,通过磷脂脂肪酸分析和核酸分析等分子生物学方法,还需要进一步深入研究。

参考文献:

BAO SD, 2000. Soil agricultural chemical analysis [M]. Beijing, China: China Agriculture Press: 14–112. [鲍士旦, 2000. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社: 14–112.]

CAI DS, MA ZL, 2008. Main ecological problems in Lijiang River Watershed [J]. J Guangxi Norm Univ (Nat Sci Ed), 26(1): 110–111. [蔡德所, 马祖陆, 2008. 漓江流域的主要生态环境问题研究 [J]. 广西师范大学学报: 自然科学版, 26(1): 110–111.]

CAI DS, MA ZL, ZHAO XG, et al, 2009. Remote sensing supervision on spatio-temporal evolution of karst wetland in recent 40 years in Huixian District of Guilin, China [J]. J Guangxi Norm Univ (Nat Sci Ed), 27(2): 111–117. [蔡德所, 马祖陆, 赵湘桂, 等, 2009. 桂林会仙岩溶湿地近 40 年演变的遥感监测 [J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 27(2): 111–117.]

CHEN WF, SHI YX, 2010. Distribution characteristics of microbes in new-born wetlands of the Yellow River Delta [J]. Acta Agr Sin, 18(6): 859–864. [陈为峰, 史衍玺, 2010. 黄河三角洲新生湿地不同植被类型土壤的微生物分布特征 [J]. 草地学报, 2010, 18(6): 859–864.]

CONANT RT, DALLA-BETTA P, KLOPATEK CC, et al, 2004. Controls on soil respiration in semiarid soils [J]. Soil Biol Biochem, 36(6): 945–951.

DING H, LING Y, XU YT, et al, 2007. Investigation on rhizosphere microbes of bulrush wetland of Mengqing Garden [J]. Sichuan Environ, 26(2): 6–10. [丁浩, 凌云, 徐亚同, 等, 2007. 梦清园芦苇湿地根际微生物特性研究 [J]. 四川环境, 26(2): 6–10.]

DUAN JY, HE XL, DAI XP, et al, 1985. Studies on the rhizosphere microbes of *Phragmites communis* Trin. and its biological activities under different ecological conditions [J]. Chin J Ecol, (2): 13–16. [段俊英, 何秀良, 戴祥鹏, 等, 1985. 不同生态条件下芦苇(*Phragmites communis* Trin.) 根际微生物及其生物学活性的调查研究 [J]. 生态学杂志, (2): 13–16.]

GAO TY, MA P, ZHANG D, et al, 2008. Quantitative characteristics of soil microorganism in Dry-Hot Valley, Yunnan Province [J]. J Wuhan Univ (Nat Sci Ed), 54(2): 183–187. [高庭艳, 马培, 张丹等, 2008. 云南元谋干热河谷区土壤微生物数量特征 [J]. 武汉大学学报(理学版), 54(2): 183–187.]

ENGLONER AI, 2009. Structure, growth dynamics and biomass of reed (*Phragmites australis*)——a review. [J]. Flora-Morphol, Dist Func Ecol Plants, 204(5): 331–346.

HU RP, GONG GS, YANG H, et al, 2010. Research on the number of fungi and actinomycetes in the rhizosphere soil planted with medicinal plant in the Zhongjiang County of Sichuan Province [J]. J Anhui Agric Sci, 38(25): 13743–13744. [胡容平, 龚国淑, 杨皓, 等, 2010. 四川中江县药用植物根际土壤真菌与放线菌数量研究 [J]. 安徽农业科学, 38(25): 13743–13744.]

JIN ZJ, CHENG YJ, LI Q, et al, 2014. Content of soil organic car-

bon and its relationship with nutrients in karst cave wetlands, paddy fields and dry farmlands in Huixian [J]. Wetl Sci, 12(4): 485–490. [靳振江, 程亚平, 李强, 等, 2014. 会仙喀斯特溶洞湿地、稻田和旱田土壤有机碳含量及其与养分的关系 [J]. 湿地科学, 12(4): 485–490.]

LEI K, ZHANG MX, 2005. The wetland resources in China and the conservation advices [J]. Wetl Sci, 3(2): 81–86. [雷昆, 张明祥, 2005. 中国的湿地资源及其保护建议 [J]. 湿地科学, 3(2): 81–86.]

LEI X, LI B, LI X, et al, 2015. Rhizosphere microbial communities of three plants in vertical-flow constructed wetland [J]. Chin J Ecol, 34(5): 1373–1381. [雷旭, 李冰, 李晓, 等, 2015. 复合垂直流人工湿地系统中不同植物根际微生物群落结构 [J]. 生态学杂志, 34(5): 1373–1381.]

LIU YY, LI F, SUN QY, et al, 2013. Review on the study of soil microorganisms in wetland ecosystems [J]. Chin J Appl Environ Biol, 19(3): 547–552. [刘银银, 李峰, 孙庆业, 等, 2013. 湿地生态系统土壤微生物研究进展 [J]. 应用与环境生物学报, 19(3): 547–552.]

MA ZL, CAI DS, JIANG ZC, 2009. About Karst Wetland classification system [J]. J Guangxi Norm Univ (Nat Sci Ed), 27(2): 101–106. [马祖陆, 蔡德所, 蒋忠诚, 2009. 岩溶湿地分类系统研究 [J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 27(2): 101–106.]

MIETHLING R, WIELAND G, BACKHAUS H, et al, 2000. Variation of microbial rhizosphere communities in response to crop species, soil origin, and inoculation with *Sinorhizobium meliloti* L33. [J]. Microb Ecol, 40(1): 43–56.

SHEN DF, LI SJ, CAI DS, et al, 2010. Element geochemistry of lake sediments from Sihue Lake in Guilin karst wetland region and its environmental effect [J]. Geol J Chin Univ, 16(4): 517–526. [沈德福, 李世杰, 蔡德所, 等, 2010. 桂林岩溶湿地沉积物地球化学元素变化的环境影响因子分析 [J]. 高校地质学报, 16(4): 517–526.]

SU FL, WANG J, GUO CJ, et al, 2012. Dynamic changes of soil microbe quantity in Estuary Reed Wetland [J]. J Shenyang Agric Univ, 43(3): 370–373. [苏芳莉, 王娟, 郭成久, 等, 2012. 河口芦苇湿地土壤微生物数量的动态变化分析 [J]. 沈阳农业大学学报, 43(3): 370–373.]

VENEKLAAS EJ, STEVENS J, CAWTHRAY GR, et al, 2003. Chickpea and white lupin rhizosphere carboxylates vary with soil properties and enhance phosphorus uptake [J]. Plant Soil, 248(1): 187–97.

WEI F, 2010. Study on biodiversity and protection of karst wetland in Huixian [D]. Guilin: Guangxi Normal University: 11–21. [韦峰, 2010. 桂林会仙喀斯特湿地生物多样性及保护研究 [D]. 广西师范大学: 11–21.]

WU LH, SHAO YQ, LU JY, et al, 2014. Soil microbes and their distribution in Wuliangshuai Wetland [J]. J Agro-Environ Sci, 33(4): 759–764. [武林慧, 邵玉琴, 鲁横根, 等, 2014. 乌梁素海湿地过渡带土壤微生物类群数量与分布特征 [J]. 农业环境科学学报, 33(4): 759–764.]

WU YK, MO YF, ZOU SZ, 2006. Ecologic problem and protection method of karst wetland in Huixian, Guilin [J]. Carsol Sin, 25(1): 85–88. [吴应科, 莫源富, 邹胜章, 2006. 桂林会仙岩溶湿地的生态问题及其保护对策 [J]. 中国岩溶, 25(1):

(下转第 748 页 Continue on page 748)