

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第4期 Vol.33 No.4 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 4 期 2013 年 2 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法 王晓学,沈会涛,李叙勇,等 (1019)
- 植物叶片水稳定同位素研究进展 罗伦,余武生,万诗敏,等 (1031)
- 城市景观格局演变的生态环境效应研究进展 陈利顶,孙然好,刘海莲 (1042)
- 城市生物多样性分布格局研究进展 毛齐正,马克明,邬建国,等 (1051)
- 基于福祉视角的生态补偿研究 李惠梅,张安录 (1065)

个体与基础生态

- 土著菌根真菌和混生植物对羊草生长和磷营养的影响 雷垚,郝志鹏,陈保冬 (1071)
- 干旱条件下 AM 真菌对植物生长和土壤水稳定性团聚体的影响 叶佳舒,李涛,胡亚军,等 (1080)
- 转 *mapk* 双链 RNA 干扰表达载体黄瓜对根际土壤细菌多样性的影响 ... 陈国华,弭宝彬,李莹,等 (1091)
- 北京远郊区臭氧污染及其对敏感植物叶片的伤害 万五星,夏亚军,张红星,等 (1098)
- 茅苍术叶片可培养内生细菌多样性及其促生潜力 周佳宇,贾永,王宏伟,等 (1106)
- 低温对蝶蛹金小蜂卵成熟及其数量动态的影响 夏诗洋,孟玲,李保平 (1118)
- 六星黑点豹蠹蛾求偶行为与性信息素产生和释放的时辰节律 刘金龙,荆小院,杨美红,等 (1126)
- 氟化物对家蚕血液羧酸酯酶及全酯酶活性的影响 米智,阮成龙,李姣蓉,等 (1134)
- 不同温度对脊尾白虾胚胎发育与幼体变态存活的影响 梁俊平,李健,李吉涛,等 (1142)

种群、群落和生态系统

- 生态系统服务多样性与景观多功能性——从科学理念到综合评估 吕一河,马志敏,傅伯杰,等 (1153)
- 不同端元模型下湿地植被覆盖度的提取方法——以北京市野鸭湖湿地自然保护区为例 崔天翔,官兆宁,赵文吉,等 (1160)
- 基于光谱特征变量的湿地典型植物生态类型识别方法——以北京野鸭湖湿地为例 林川,官兆宁,赵文吉,等 (1172)
- 浮游植物群落对海南小水电建设的响应 林彰文,林生,顾继光,等 (1186)
- 菹草种群内外水质日变化 王锦旗,郑有飞,王国祥 (1195)
- 南方红壤区 3 种典型森林恢复方式对植物群落多样性的影响 王芸,欧阳志云,郑华,等 (1204)
- 人工油松林恢复过程中土壤理化性质及有机碳含量的变化特征 胡会峰,刘国华 (1212)
- 不同区域森林火灾对生态因子的响应及其概率模型 李晓炜,赵刚,于秀波,等 (1219)

景观、区域和全球生态

- 快速城市化地区景观生态安全时空演化过程分析——以东莞市为例 杨青生,乔纪纲,艾彬 (1230)
- 海岸带生态系统健康评价中能质和生物多样性的差异——以江苏海岸带为例 唐得昊,邹欣庆,刘兴健 (1240)
- 干湿交替频率对不同土壤 CO₂ 和 N₂O 释放的影响 欧阳扬,李叙勇 (1251)

西部地区低碳竞争力评价..... 金小琴,杜受祜 (1260)

基于 HEC-HMS 模型的八一水库流域洪水重现期研究 郑 鹏,林 韵,潘文斌,等 (1268)

基于修正的 Gash 模型模拟小兴安岭原始红松林降雨截留过程 柴汝杉,蔡体久,满秀玲,等 (1276)

长白山北坡不同林型内红松年表特征及其与气候因子的关系..... 陈 列,高露双,张 赞,等 (1285)

资源与产业生态

河西走廊绿洲灌区循环模式“农田-食用菌”生产系统氮素流动特征 李瑞琴,于安芬,赵有彪,等 (1292)

施肥对旱地花生主要土壤肥力指标及产量的影响..... 王才斌,郑亚萍,梁晓艳,等 (1300)

耕作措施对土壤水热特性和微生物生物量碳的影响..... 庞 绪,何文清,严昌荣,等 (1308)

基于改进 SPA 法的耕地占补平衡生态安全评价 施开放,刁承泰,孙秀锋,等 (1317)

学术争鸣

基于生态-产业共生关系的林业生态安全测度方法构想 张智光 (1326)

中国生态学会 2013 年学术年会征稿须知 (I)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 318 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 34 * 2013-02



封面图说: 石羊河——石羊河流域属大陆性温带干旱气候,气候特点是:日照充足、温差大、降水少、蒸发强、空气干燥。石羊河源出祁连山东段,河系以雨水补给为主,兼有冰雪融水成分。上游的祁连山区降水丰富,有雪山冰川和残留林木,是河流的水源补给地。中游流经河西走廊平地,形成武威和永昌等绿洲,下游是民勤,石羊河最后消失在腾格里沙漠中。随着石羊河流域人水矛盾的不断加剧,水资源开发利用严重过度,荒漠化日趋严重,民勤县的生态环境已经相当恶化,继续下去将有可能变成第二个“罗布泊”。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201205190748

欧阳扬, 李叙勇. 干湿交替频率对不同土壤 CO₂ 和 N₂O 释放的影响. 生态学报, 2013, 33(4): 1251-1259.

Ouyang Y, Li X Y. Impacts of drying-wetting cycles on CO₂ and N₂O emissions from soils in different ecosystems. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(4): 1251-1259.

干湿交替频率对不同土壤 CO₂ 和 N₂O 释放的影响

欧阳扬^{1,2}, 李叙勇^{1,*}

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 干旱、半干旱和地中海气候区, 乃至一些湿润地区, 由干湿交替引起的土壤碳、氮的短暂脉冲式释放很大程度上决定着长时间尺度温室气体释放的总量, 是土壤碳、氮温室气体释放的关键过程。选择我国降雨梯度下的森林、农田、草地和荒漠生态系统, 采集土样进行实验室统一控制条件下的多重干湿交替循环, 对比探讨不同生态系统土壤干湿交替频率对 CO₂ 和 N₂O 释放的影响模式。结果表明: (1) 干湿交替能够显著的激发土壤中 CO₂ 和 N₂O 的释放, 森林、农田、草地和荒漠土壤 CO₂ 和 N₂O 释放速率对干湿交替的响应模式基本一致, 其响应强度与土壤本底中碳和氮的含量有关; (2) 在一定培养时间内, 随着干湿交替频率的增加, 土壤再湿润阶段 CO₂ 释放速率降低, 但是, 气体释放的总量较之于恒湿对照组有所增加。 (3) 不同土壤 N₂O 的释放总量对干湿交替频率的响应模式表现出很大的差异, 其中农田和荒漠土壤响应模式类似。

关键词: 干湿交替频率; 温室气体; 土壤 CO₂ 释放; 土壤 N₂O 释放

Impacts of drying-wetting cycles on CO₂ and N₂O emissions from soils in different ecosystems

OUYANG Yang^{1,2}, LI Xuyong^{1,*}

1 State Key Lab of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: In the context of climate change impacts on the rainfall patterns, understanding the effects of soil drying-rewetting cycles on green-house gas emission has become increasingly important in many ecosystems. Soil carbon and nitrogen releases caused by drying and rewetting cycles largely determine the total amount of greenhouse gases emission for a long time in an ecosystem. Such kind of influence is particularly important in arid, semi-arid and Mediterranean regions. The soil drying-rewetting cycle is a natural phenomenon that the soil experiences drying, then wetting, and then drying and rewetting again and again. When a dry soil is being rewetted, the amount of soil microbial biomass and its activity can be sharply increasing in a short time period, and then a large amount of gaseous carbon (C) and nitrogen (N) erupts from the soil. The sudden release of gaseous C and N is caused by the stimulation of the soil microbes. Such a phenomenon is called "Birch effect". The drying-rewetting cycles play an important role in the feedbacks of terrestrial ecosystems. In this study, soil samples were taken from four field sites of forest, agriculture, grassland and desert ecosystems along the precipitation gradient in China. These four sites are Beijing Forest Ecosystem Study, Ansai Agricultural Ecosystem Study, Inner Mongolia Grassland Study and Fukang Desert Ecosystem Study sites of the Chinese Ecosystem Research Network (CERN). Based on the laboratory experiment with 0, 2, 5, 7 and 14 drying-rewetting cycles in the controlling temperature, we examined the patterns of drying-rewetting impacts on soil CO₂ and N₂O emission. Our results showed that: (1) Drying and

基金项目: 国家自然科学基金(41071323, 40971271); 国家重点基础研究发展规划项目计划课题(2009CB421104)

收稿日期: 2012-05-19; 修订日期: 2012-10-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xyli@rcees.ac.cn

rewetting cycles significantly stimulated the CO_2 and N_2O releases from soil. For example, in comparison with the control experiment with constant soil moisture in the grassland soil, the average respiration rate of 14-cycle, 7-cycle, 5-cycle and 2-cycle treatments increased 43%、103%、116% and 192%, respectively. We also found that response patterns in CO_2 and N_2O release rates to drying and rewetting frequencies were similar among different ecosystem soils. The initial rewetting pulses were the highest, and then declined over time. (2) The total amount of CO_2 released from the cycling soil was higher than that from its corresponding control treatment with constant soil moisture. In the forest soil, the 14-cycle soil released a total of $360.11 \mu\text{g C-CO}_2/\text{g soil}$ in comparison with the control treatment with constant soil moisture, which released $284.56 \mu\text{g C-CO}_2/\text{g soil}$. The cycling increased respiration by 27%. In the grassland soil, the 14-cycle soil released a total of $339.88 \mu\text{g C-CO}_2/\text{g soil}$ in comparison with the control treatment, which released $244.01 \mu\text{g C-CO}_2/\text{g soil}$, increased by 39%. In the agriculture soil, the 14-cycle soil released a total of $299.31 \mu\text{g C-CO}_2/\text{g soil}$ in comparison with the control treatment, which released $143.27 \mu\text{g C-CO}_2/\text{g soil}$, increased respiration by 109%. In the desert soil, the 14-cycle soil released a total of $167.54 \mu\text{g C-CO}_2/\text{g soil}$ in comparison with the control treatment, which released $142.79 \mu\text{g C-CO}_2/\text{g soil}$, increased respiration by 17%. (3) Cumulative N_2O release among different ecosystem soils had different drying-rewetting response patterns, but soils from the agriculture and desert ecosystems have similar response patterns.

Key Words: drying-rewetting cycles, Birch effect, soil respiration, N_2O emission

全球气候变化的一个重要表征是降雨格局的改变,常常表现为干旱和极端降雨事件的增加,并且交替出现,这种变化特征在干旱、半干旱和地中海气候区表现得尤为明显^[1]。甚至在年降水总量较高的地区,由于极端降雨事件的增加,干旱和降雨交替格局也日益显著,这种干湿交替变化深刻影响着陆地生态系统过程,特别是土壤碳(C)、氮(N)的生物地球化学过程,进而强烈地影响着土壤碳、氮的矿化和土壤温室气体的排放^[2-3]。

土壤干湿交替是指土壤经历干旱,随后经历湿润,然后又经历干旱和湿润的这种交替出现的循环过程。干湿交替引起的生态系统变化的一个重要特征是“Birch 效应”,即经历着干旱的土壤遇到降雨,特别是显著的降雨,能够极大地激发微生物活性,导致土壤有机质矿化速率的急剧增加,从而引起短期内快速释放大量的碳、氮^[4-6],这种碳、氮的释放主要表现为以温室气体(如 CO_2 , N_2O)排放和以矿化形态(如 NH_4^+ , NO_3^-)从土壤中淋失。研究表明,干旱土壤湿润后,土壤 CO_2 释放量能够激增至原来的 2—10 倍,随着湿润土壤再干旱,释放量下降直至湿润前的水平,这个过程大致持续 2—6d^[7-9]。在干旱、半干旱和地中海气候区,乃至一些湿润地区,这种由干湿交替引起的土壤碳、氮的短暂脉冲式释放很大程度上决定着长时间尺度温室气体释放的总量,是土壤碳、氮温室气体释放的关键过程^[2, 8];因此,气候变化影响下土壤干湿交替引起的短暂的碳、氮激增的脉冲释放过程研究,对认识土壤温室气体排放有着重要的科学意义。

1 研究区域和研究方法

1.1 研究区概况

野外采样用以进行室内干湿交替控制试验的站点主要位于我国东西主线的气候带上,并全部是中国生态系统研究网络(CERN)站,是沿东西走向的降雨梯度,干旱及半干旱半湿润地区是干湿交替影响的 Birch 效应最为显著的气候区,我国受季风气候影响,从东到西降雨量和场次降雨频率呈降低趋势;再者,随着我国从半干旱半湿润到干旱地区降雨梯度的变化,也呈现出不同的生态系统类型,据此我们选定四个观测点,分别是北京森林站(位于北京门头沟区东灵山)、安塞农田站(位于陕西安塞县)、内蒙古草原站(位于内蒙古锡林郭勒)和阜康荒漠站(位于新疆阜康县)。

1.2 实验设计

用于该实验的土壤分别取自于北京森林站、内蒙古草地站、长武农田站和阜康荒漠站(土壤基本理化性质如表 1),所采集的土壤样品经过 7d 的平衡培养之后,每个试验样品称取 100g(干重)土壤,放入 1000mL 的

罐头瓶,盖子上钻有一个小孔,利于注射器采集气体样品。

表 1 站点基本情况和土壤基本理化性质

Table 1 Properties of experimental soils

站点 Sites	年平均降 雨量 MAP /mm	年平均温度 MAT /℃	土壤类型 Soil types	pH (水土比 2:1)	总氮 Total N /(g/kg)	土壤有机碳 Soil organic C /(g/kg)	粒径 Soil texture/%		
							粘粒 Clay	粉粒 Silt	沙粒 Sand
北京站	600	5	棕壤	7.45	3.04	34.71	0.91	42.64	56.45
安塞站	500	8.8	黄绵土	8.38	0.84	17.84	0.99	34.72	64.28
内蒙古站	350	0.2	栗钙土	6.73	1.94	17.03	1.37	42.59	56.04
阜康站	164	6.6	灰漠土	9.36	0.59	9.97	2.69	59.54	37.76

对土壤进行不同的干旱和再湿润处理,温度恒定在 20℃,同时设置 40% 土壤持水量 (WHC) 的恒湿处理作为对照,并设 2、5、7、14 这 4 个干湿循环频率,每个处理设置 3 个重复。一个干湿循环开始于再湿润(加水),并且使之维持在 40% WHC 培养 2d,然后就是干旱期开始时的 3d 风干。在再湿润的时候加入的水为无菌去离子水,干旱是指使土壤风干到 5% WHC。恒湿处理使土壤湿度维持在 40% WHC;2 个循环处理的每个干旱期长为 30d,总计培养时间为 77d;5 个循环处理的每个干旱期为 10d,总计培养时间为 82d;7 个循环的每个干旱期为 5d,总计培养时间为 77d;14 个循环处理的是指只要土壤干旱(土壤含水率达到 5% WHC)即可,总计培养时间 77d。

上述控制试验的设计方案见图 1。

1.3 测定方法

土壤理化性质测定^[10]:土壤有机质采用重铬酸钾氧化-外加热法;土壤全氮、全碳采用元素分析仪 (Vario EL III) 测定;土壤 pH 值用酸度计测定;土壤质量含水量采用烘干法测定;土壤粒径采样激光粒度仪 (Mastersizer 2000) 测定;土壤持水量 (WHC) 测定主要参照 Fierer 和 Schimel 的方法^[15]。

在湿润开始和结束(湿润阶段培养瓶完全密封)用医用注射器抽取气体样品,测定土壤温室气体 (CO₂ 和 N₂O) 在每个湿润阶段的积累量。CO₂ 样品的测定采用带有氢离子火焰检测器的气相色谱仪器 (GC112A, 北京分析仪器厂) 进行分析;N₂O 的浓度通过带有点子捕获检测器 (ECD) 的气相色谱仪 (GC, SP3410, 北京分析仪器厂) 进行分析。

1.4 数据分析

利用 Origin8.5 (Origin Lab Corporation, USA) 进行画图。不同干湿循环间的差异利用 spss12.0 软件进行方差分析,差异显著性水平 ($P < 0.05$) 通过最小显著差数法 (LSD) 进行检验。

2 结果与分析

2.1 CO₂ 的释放

2.1.1 每个再湿润阶段 CO₂ 释放速率的动态变化和平均值

图 2 为每个再湿润阶段 CO₂ 释放的动态变化。从图中可以明显看出,4 个处理组 CO₂ 的释放速率都要高于恒湿对照组,14 个循环处理的 CO₂ 释放速率的变化趋势与恒湿处理一致,都是在培养的前 40d 有明显的下降趋势,然后趋于平稳。还可以看出干湿循环中干旱期越长,再湿润阶段 CO₂ 的释放速率越大。4 种不同生态系统土壤 CO₂ 释放速率的变化模式一致。例如在内蒙古草原土壤中,14 循环、7 循环、5 循环和 2 循环 4 个

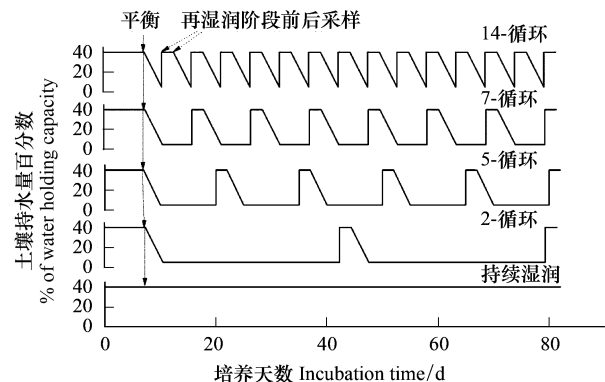


图 1 土壤干湿交替控制试验方案示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental design

处理中 CO_2 的平均释放速率分别是恒湿处理的 1.43 倍、2.03 倍、2.16 倍和 2.92 倍。

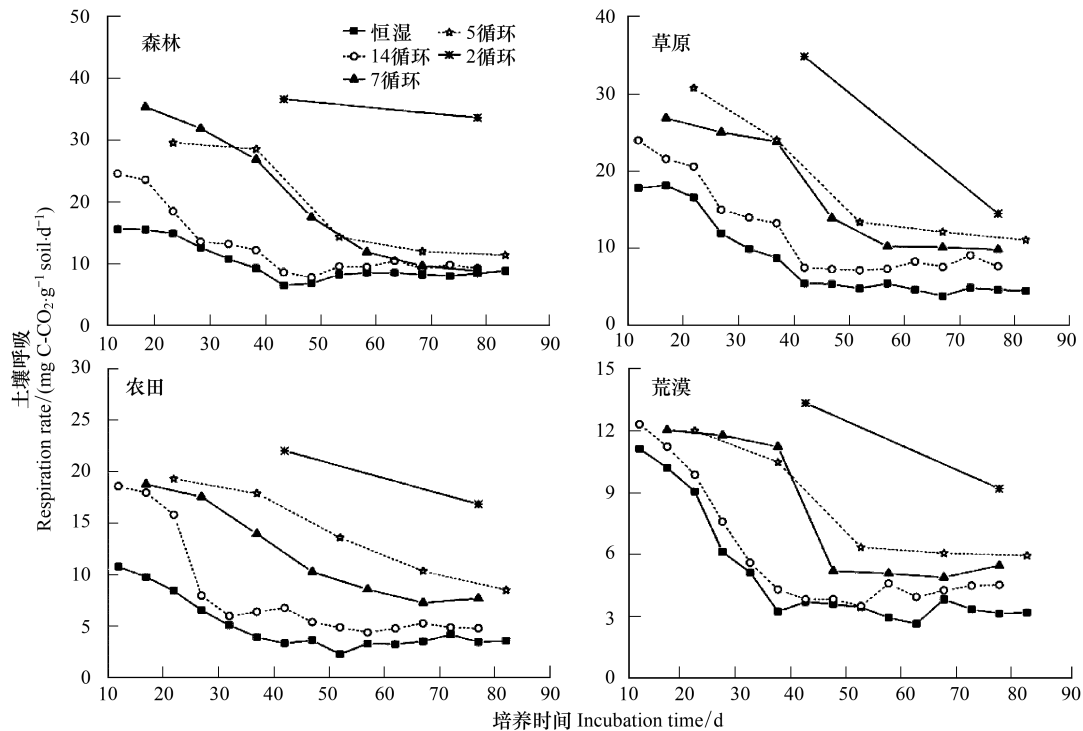


图 2 干湿交替过程中每个再湿润阶段土壤呼吸速率变化

Fig. 2 Soil respiration rate for dry/wet treatments in every rewetting phrase

2.1.2 第 1 个循环和最后一个循环再湿润阶段 CO_2 释放速率的变化

干旱土壤再湿润能够激发土壤呼吸速率的脉冲事件。如图 3, 所有土壤在经历第 1 次再湿润时, 都有明显的 CO_2 释放的激发现象。并且随着干湿交替频率的增加(干旱期的减短)而减少。在森林和草原土壤中, 各干湿交替处理中土壤呼吸速率都显著高($P < 0.05$)于恒湿对照。在 2-循环中, 森林土壤和草地土壤分别是其恒湿对照组的 2.3 倍和 2.0 倍。在农田和荒漠土壤中, 虽然 14-循环、7-循环和 5-循环与对照组没有统计上的显著增加, 但是 2-循环显著高于恒湿对照, 分别是对照组的 1.9 倍和 1.2 倍。在最后一个循环的再湿润中, 虽然也都存在土壤呼吸的激发现象, 但是相对于第 1 个次再湿润而言, 14-循环、7-循环和 5-循环的激发强度都有所减弱。2-循环处理只有经历 2 次再湿润阶段, 土壤在第 2 次经历再湿润时, 较之于第 1 次再湿润, 森林和农田土壤呼吸的减少量并不明显, 不过草原土壤和荒漠土壤减少较多, 分别减少 58.49% 和 31.06%; 较之于恒湿对比而言, 森林、农田、草原和荒漠土壤分别是对照的 3.8 倍、4.7 倍、3.2 倍和 2.9 倍。

2.1.3 整个再湿润阶段 CO_2 释放的积累量

图 4 中恒湿对照中土壤呼吸的积累量是与 14-循环相对应的湿润天数所积累的土壤呼吸总量。总的来说, 干湿交替处理中土壤呼吸的积累量都高于与之相对应的恒湿对照, 由图可以看出农田土壤呼吸积累量增加得最为显著。在森林土壤中, 14-循环的土壤呼吸积累量为 $360.11 \mu\text{gC-CO}_2/\text{g}$ 土与之对应的恒湿对照的积累量为 $284.56 \mu\text{gC-CO}_2/\text{g}$ 土, 增加了 26.55%。在草原土壤中, 14-循环的土壤呼吸积累量为 $339.88 \mu\text{gC-CO}_2/\text{g}$ 土与之对应的恒湿对照的积累量为 $244.01 \mu\text{gC-CO}_2/\text{g}$ 土, 增加了 39.29%。在农田土壤中, 14-循环的土壤呼吸积累量为 $299.31 \mu\text{gC-CO}_2/\text{g}$ 土与之对应的恒湿对照的积累量为 $143.27 \mu\text{gC-CO}_2/\text{g}$ 土, 增加了 108.91%。在荒漠土壤中, 14-循环的土壤呼吸积累量为 $167.54 \mu\text{gC-CO}_2/\text{g}$ 土与之对应的恒湿对照的积累量为 $142.79 \mu\text{gC-CO}_2/\text{g}$ 土, 增加了 17.33%。

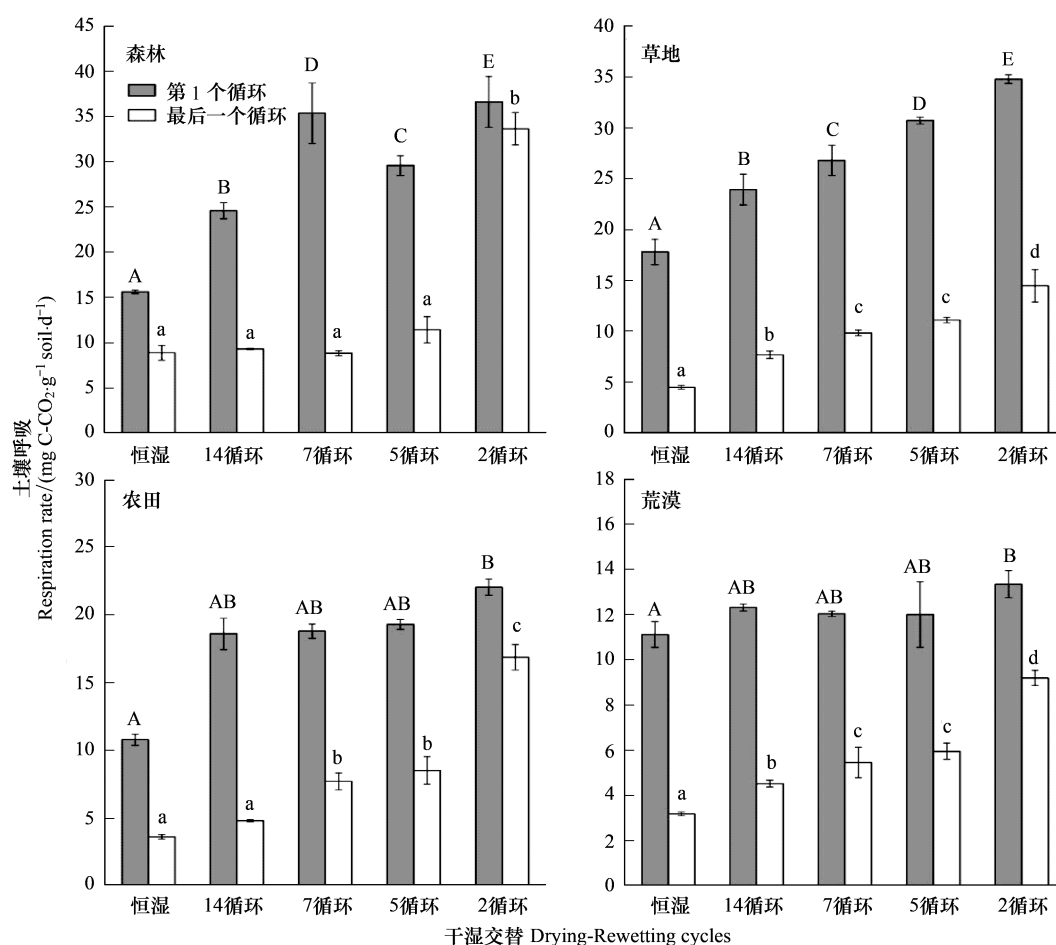


图3 第1个循环和最后一个循环中再湿润阶段土壤呼吸速率的变化

Fig. 3 CO₂ release rate for dry/wet treatments after the first and last water pulse

2.2 N₂O 的释放

2.2.1 第1个循环和最后一个循环再湿润阶段 N₂O 释放速率的变化

如图5,总的来看,通过对比第1个循环和最后一个循环再湿润阶段氧化亚氮释放速率的变化,发现除了2-循环,其他干湿交替处理使得氧化亚氮的释放速率减少,其中森林和草原土壤氧化亚氮释放速率减少最为显著,如森林土壤中的7-循环和5-循环使得氧化亚氮释放速率分别减少了93.37%和95.30%;草地土壤中的7-循环和5-循环使得氧化亚氮释放速率分别减少了72.46%和73.68%。在第1个再湿润中,森林土壤和草原土壤在14-循环、7-循环和5-循环氧化亚氮的释放速率变化与CO₂一致,都是随着干旱期增长而增加,不过在2-循环处理(30d干旱期)氧化亚氮的释放速率并不是最大。农田土壤氧化亚氮释放规律与森林和草地的正好相反,而是随着干旱期的增长,释放速率反而减少。与农田土壤类似,荒漠土壤中氧化亚氮释放速率也是14-循环为最大。不过,土壤在经历多次干湿交替之后,在最后一次再湿润条件下,所表现出来的现象与上文中CO₂释放速率变化一致。

2.2.2 整个再湿润阶段 N₂O 释放的积累量

由图6可以看出,干湿交替处理能够激发土壤中氧化亚氮的释放,其中森林土壤表现得最为显著,如5-循环处理整个再湿润阶段氧化亚氮积累量较之于对应的恒湿处理增加了295.83%,7-循环增加了221.40%,14-循环增加了65.01%。在草地土壤中,7-循环处理湿润处理整个再湿润阶段氧化亚氮积累量较之于对应的恒湿处理增加了50.81%,不过14-循环却只增加了5.53%。农田和荒漠中14-循环处理整个再湿润阶段氧化亚氮积累量较之于对应的恒湿处理分别增加了42.02%和59.37%。图中还可以看出,虽然荒漠土壤所含总

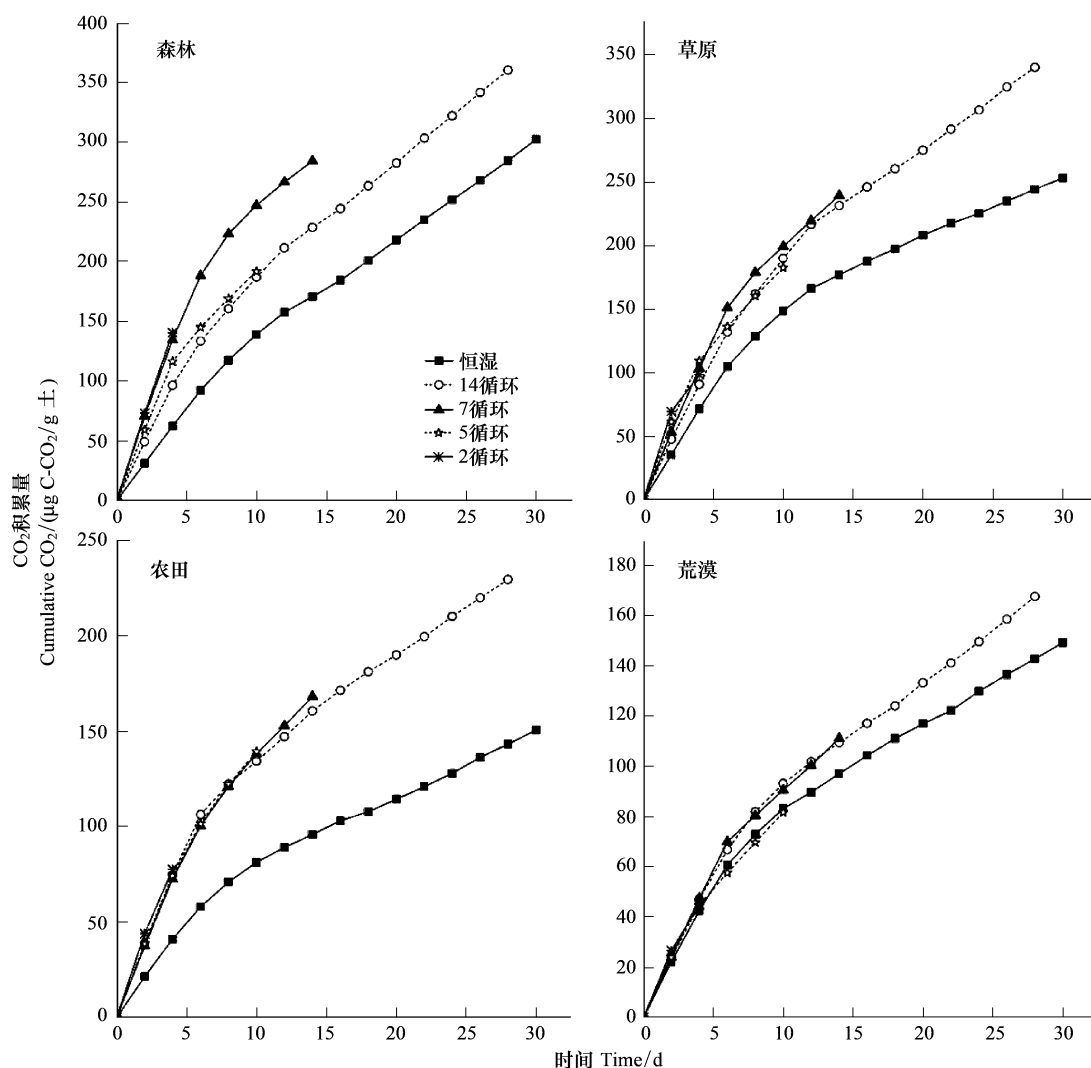


图4 土壤呼吸在整个再湿润阶段的积累量

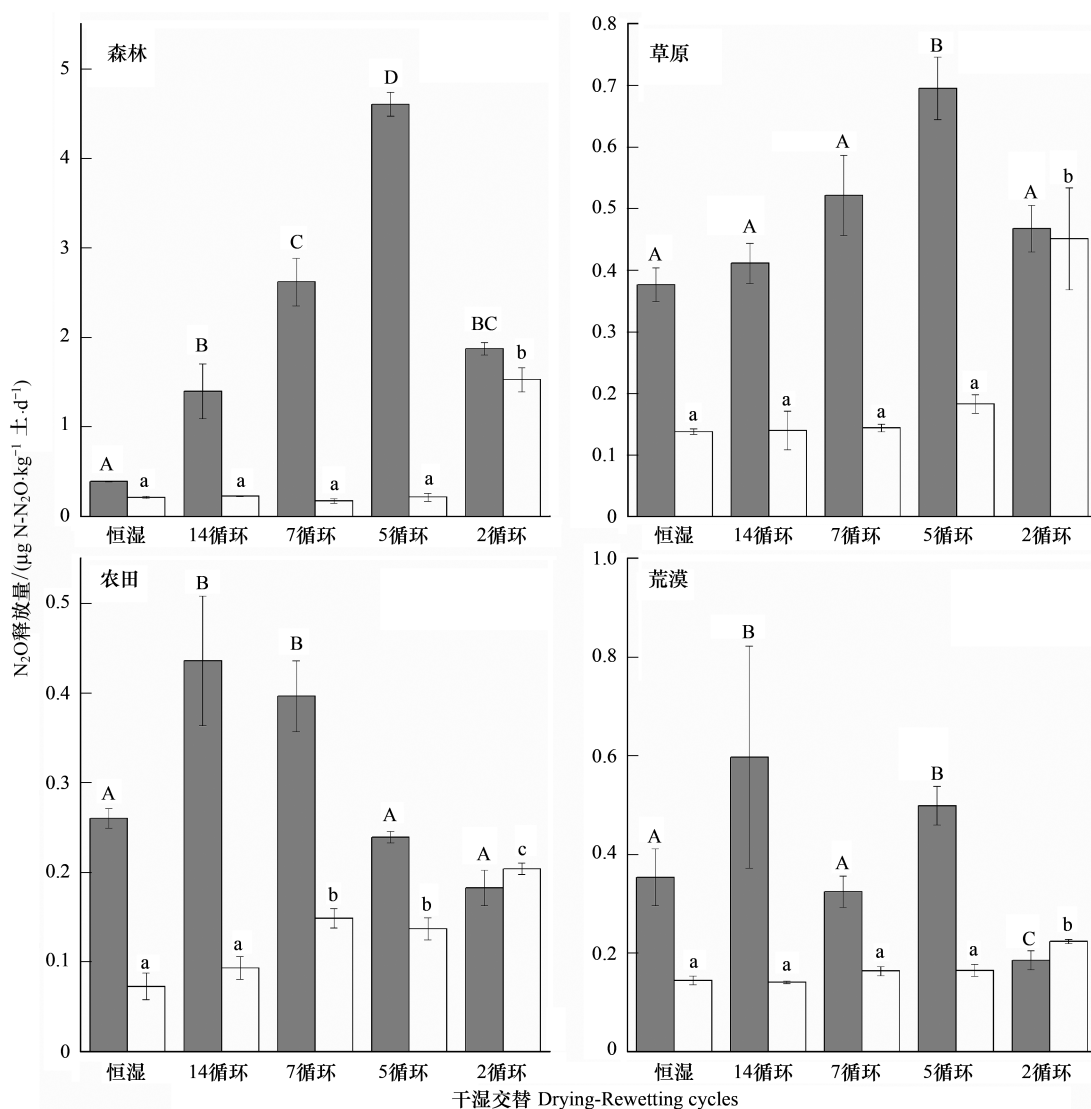
Fig. 4 Cumulative CO₂ release for the dry/wet treatments in all rewetting phrases

氮量低于农田土壤,但是其在整个室内培养过程中恒湿和14-循环处理所释放的氧化亚氮积累量却高于农田土壤。

3 讨论

当干旱的土壤再湿润的时候,通常情况下能够刺激微生物活性并释放CO₂,这种现象在干旱、半干旱和地中海生态系统中最为常见^[4, 11-14]。通过对橡树和草地土壤进行水分的室内控制实验,Fierer等^[15]发现,干旱土壤再湿润的时候,能够激发CO₂的产量,并且能够持续2—6d。Saetre等^[16]对半干旱地区两种不同植被土壤(草地和灌木)的研究发现在对土壤立即湿润的时候,17h内CO₂的产量增加了10倍。Schmitt等^[17]对挪威云杉林灰化土壤实验中,同样发现CO₂产量激发现象。本研究,4种不同生态系统类型土壤中CO₂的释放对干湿交替的响应都表现出类似的激发现象。而且,表现出来的激发总量与土壤有机碳含量有一定的关系。例如,在森林土壤中,7-循环的土壤呼吸积累量比之对应的恒湿对照的积累量66.56%。在农田土壤中,14-循环的土壤呼吸积累量比之对应的恒湿对照的积累量增加了108.91%。

目前对于干湿交替过程中土壤所释放CO₂的来源主要有两种机制来解释。一种是微生物胁迫机制。在干旱条件下,由于存在渗透调节,细胞内会通过合成可溶性有机物降低渗透压。微生物为了能够保留体内的水分,防止脱水,就会在体内积累高浓度的溶质^[18-19]。在随后的湿润条件下,环境中的水势迅速增加,为了平

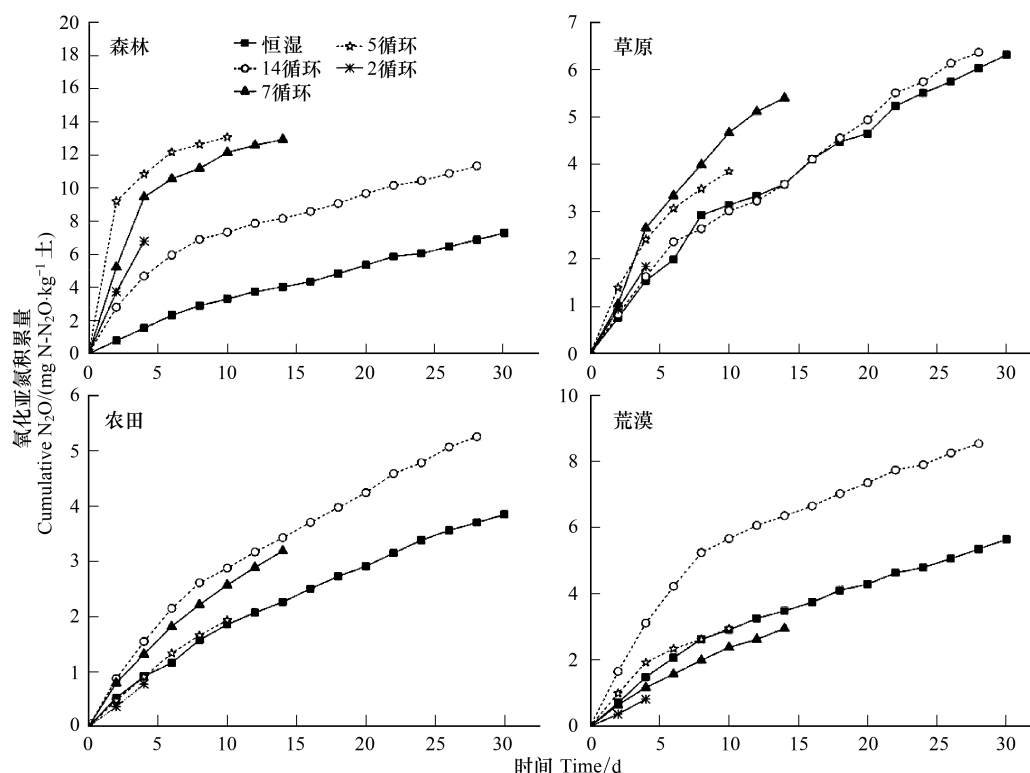
图5 第1个循环和最后一个循环中再湿润阶段 N₂O 释放速率的变化Fig. 5 N₂O release rate for dry/wet treatments after the first and last water pulse

衡外界的水势,微生物需要迅速地转化之前所积累的溶质,这些溶质被分解成含碳化合物和易分解的有机碳^[20]。另一种是底物供应机制,在干旱条件下,土壤团粒结构会被压缩,从而暴露新的土壤表面和前期受到保护的有机质^[21-22]。土壤再经历湿润的时候,土壤会膨胀,土壤团粒结构遭到进一步的破坏,暴露给微生物的有机质表面会进一步增加,从而增加了土壤养分的生物可利用性^[23]。

干湿交替对土壤氮素释放的影响主要表现在对土壤 N₂O 排放和矿化态氮的淋失的影响^[24]。土壤中 N₂O 产生的机制是多方面的,受许多因子影响,土壤硝化作用和反硝化作用是其主要来源。在一定土壤水分含量范围内,硝化速率随水分含量增加而增加,当土壤水分的增加使氧的供应受到限制时,硝化速率开始下降^[2, 5, 25]。土壤的干湿交替使得硝化作用和反硝化作用交替进行,从而促进了 N₂O 的产生^[26]。由于土壤的干湿交替增加了死亡微生物的量以及打乱了土壤环境和有机物之间的相互作用而使得土壤有效碳和氮的矿化量增加,使土壤的硝化和反硝化量显著高于长期湿润的土壤。

4 结论

(1) 干湿交替处理激发了 CO₂ 的释放速率。在特定时间内,随着干湿交替频率的减少(干旱期的增长),再湿润阶段 CO₂ 的释放速率增大。森林、农田、草地和荒漠土壤 CO₂ 的释放速率表现出一致的响应模式。

图6 土壤 N_2O 释放在整个再湿润阶段的积累量Fig. 6 Cumulative N_2O release for the dry/wet treatments in all rewetting phrases

(2)在整个干湿交替处理中,各处理组在再湿润阶段 CO_2 释放的积累量高于与之相对应的恒湿对照。在14-循环处理中,农田土壤再湿润阶段 CO_2 释放的积累量比恒湿对照增加了 108.91%,草地土壤增加了 39.29%,森林土壤增加了 26.55%。

(3)干湿交替处理也同样激发了 N_2O 的释放速率和释放量。森林土壤表现得最为显著,如5-循环处理整个再湿润阶段氧化亚氮积累量较之于对应的恒湿处理增加了 295.83%,7-循环增加了 221.40%,14-循环增加了 65.01%。不同土壤中 N_2O 释放对干湿交替频率的响应模式存在一定的差异。其中农田和荒漠土壤中 N_2O 的释放总量对干湿交替频率的响应模式类似。

References:

- [1] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Huygens D, Schoupe J, Roobroeck D, Alvarez M, Balocchi O, Valenzuela E, Pinochet D, Boeckx P. Drying-rewetting effects on N cycling in grassland soils of varying microbial community composition and management intensity in south central Chile. *Applied Soil Ecology*, 2011,48(3): 270-279.
- [3] de Graaff M A, Six J, Harris D, Blum H, van Kessel C. Decomposition of soil and plant carbon from pasture systems after 9 years of exposure to elevated CO_2 : impact on C cycling and modeling. *Global Change Biology*, 2004,10(11):1922-1935.
- [4] Schimel J P, Wetterstedt J A M, Holden P A, Trumbore S E. Drying/rewetting cycles mobilize old C from deep soils from a California annual grassland. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011,43(5):1101-1103.
- [5] Borken W, Matzner E. Reappraisal of drying and wetting effects on C and N mineralization and fluxes in soils. *Global Change Biology*, 2009,15(4):808-824.
- [6] Birch H F. The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability. *Plant and Soil*, 1958,10:9-31.
- [7] Butterly C R, McNeill A M, Baldock J A, Marschner P. Rapid changes in carbon and phosphorus after rewetting of dry soil. *Biology and Fertility of Soils*, 2011,47(1):41-50.

- [8] Schimel J, Balser T C, Wallenstein M. Microbial stress-response physiology and its implications for ecosystem function. *Ecology*, 2007, 88(6): 1386-1394.
- [9] Fierer N, Schimel J P. A proposed mechanism for the pulse in carbon dioxide production commonly observed following the rapid rewetting of a dry soil. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(3): 798-805.
- [10] Rukun L. Analysis methods of Soil Agricultural Chemistry. Beijing: China Agricultural Science Press, 2000.
- [11] Yang Yusheng C G, Dong Bin, Wang Xiaoguo, Xie Jinsheng. Responses of soil respiration to soil rewetting in a natural forest and two monoculture plantations in subtropical China. *Acta Pedologia Sinica*, 2004, 24(5): 953-958.
- [12] Li Chenhua T L, Li Yan. Effects of air-drying and rewetting on physico-chemical properties and microbial activity of desert grey soil. *Acta Pedologia Sinica*, 2007, 44(2): 364-367.
- [13] Wu J, Brookes P C. The proportional mineralisation of microbial biomass and organic matter caused by air-drying and rewetting of a grassland soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(3): 507-515.
- [14] Wang Y D W H M, Ma Z Q, Li Q K, Shi L L, Xu F. Review of response mechanism of soil respiration to rainfall. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(5): 601-610.
- [15] Fierer N, Schimel J P. Effects of drying-rewetting frequency on soil carbon and nitrogen transformations. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34(6): 777-787.
- [16] Saetre P, Stark J M. Microbial dynamics and carbon and nitrogen cycling following re-wetting of soils beneath two semi-arid plant species. *Oecologia*, 2005, 142(2): 247-260.
- [17] Schmitt A, Glaser B, Borken W, Matzner E. Organic matter quality of a forest soil subjected to repeated drying and different re-wetting intensities. *European Journal of Soil Science*, 2010, 61(2): 243-254.
- [18] Halverson L J, Jones T M, Firestone M K. Release of intracellular solutes by four soil bacteria exposed to dilution stress. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(5): 1630-1637.
- [19] Harris R F. The effect of water potential on microbial growth and activity//Water potential relations in soil microbiology. SSSA Special Publication No. 9, Wisconsin, USA., 1981: 23-95.
- [20] Sugai S F, Schimel J P. Decomposition and biomass incorporation of C¹⁴-labeled glucose and phenolics in taiga forest floor-effect of substrate quality, successional state, and season. *Soil Biology & Biochemistry*, 1993, 25(10): 1379-1389.
- [21] Denef K, Six J, Bossuyt H, Frey S D, Elliott E T, Merckx R, Paustian K. Influence of dry-wet cycles on the interrelationship between aggregate, particulate organic matter, and microbial community dynamics. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, 33(12/13): 1599-1611.
- [22] Appel T. Non-biomass soil organic N - the substrate for N mineralization flushes following soil drying-rewetting and for organic N rendered CaCl₂-extractable upon soil drying. *Soil Biology & Biochemistry*, 1998, 30(10/11): 1445-1456.
- [23] Vangestel M, Merckx R, Vlassak K. Microbial biomass responses to soil drying and rewetting the fate of fast-growing and slow-growing microorganisms in soils from different climates. *Soil Biology & Biochemistry*, 1993, 25(1): 109-123.
- [24] Beare M H, Gregorich E G, St-Georges P. Compaction effects on CO₂ and N₂O production during drying and rewetting of soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41(3): 611-621.
- [25] Zhang Wei Z X-d, He Hong-bo Research advances in soil nitrogen transformation as related to drying / wetting cycles. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(4): 783-789.
- [26] Liang Dongli T Y, Ove Emteryd, Fang Riyao, Zhang Shulan. The effects of wetting and drying cycles on N₂O emission in dryland. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2002, 20(2): 28-31.

参考文献:

- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [11] 杨玉盛, 陈光水, 董彬, 王小国, 谢锦升, 李灵, 卢豪良. 格氏栲天然林和人工林土壤呼吸对干湿交替的响应. *生态学报*, 2004, 24(5): 953-958.
- [12] 李晨华, 唐立松, 李彦. 干湿处理对灰漠土壤理化性质及微生物活性的影响. *土壤学报*, 2007, 44(2): 364-367.
- [13] 王义东, 王辉民, 马泽清, 李庆康, 施蕾, 徐飞. 土壤呼吸对降雨响应的研究进展. *植物生态学报*, 2010, 34(5): 601-610.
- [25] 张威, 张旭东, 何红波, 解宏图, 白震. 干湿交替条件下土壤氮素转化及其影响研究进展. *生态学杂志*, 2010, 29(4): 783-789.
- [26] 梁东丽, 同延安, Ove Emteryd, 方日尧, 张树兰. 干湿交替对旱地土壤 N₂O 气态损失的影响. *干旱地区农业研究*, 2002, 20(2): 28-31.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 4 February, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Concepts, processes and quantification methods of the forest water conservation at the multiple scales WANG Xiaoxue, SHEN Huitao, LI Xuyong, et al (1019)
- Advances in the study of stable isotope composition of leaf water in plants LUO Lun, YU Wusheng, WAN Shimin, et al (1031)
- Eco-environmental effects of urban landscape pattern changes: progresses, problems, and perspectives CHEN Liding, SUN Ranhao, LIU Hailian (1042)
- An overview of advances in distributional pattern of urban biodiversity MAO Qizheng, MA Keming, WU Jianguo, et al (1051)
- Ecological compensation boosted ecological protection and human well-being improvement LI Huimei, ZHANG Anlu (1065)

Autecology & Fundamentals

- Effects of indigenous AM fungi and neighboring plants on the growth and phosphorus nutrition of *Leymus chinensis* LEI Yao, HAO Zhipeng, CHEN Baodong (1071)
- Influences of AM fungi on plant growth and water-stable soil aggregates under drought stresses YE Jiashu, LI Tao, HU Yajun, et al (1080)
- The effect of transgenic cucumber with double strands RNA of *mapk* on diversity of rhizosphere bacteria CHEN Guohua, MI Baobin, LI Ying, et al (1091)
- The ambient ozone pollution and foliar injury of the sensitive woody plants in Beijing exurban region WAN Wuxing, XIA Yajun, ZHANG Hongxing, et al (1098)
- Diversity and plant growth-promoting potential of culturable endophytic bacteria isolated from the leaves of *Atractylodes lancea* ZHOU Jiayu, JIA Yong, WANG Hongwei, et al (1106)
- Effects of the low temperature treatment on egg maturation and its numerical dynamics in the parasitoid *Pteromalus puparum* (Hymenoptera: Pteromalidae) XIA Shiyang, MENG Ling, LI Baoping (1118)
- Circadian rhythm of calling behavior and sexual pheromone production and release of the female *Zeuzera leuconotum* Butler (Lepidoptera: Cossidae) LIU Jinlong, JING Xiaoyuan, YANG Meihong, et al (1126)
- Influence of fluoride on activity of carboxylesterase and esterase in hemolymph of *Bombyx mori* MI Zhi, RUAN Chenglong, LI Jiaorong, et al (1134)
- Effects of water temperature on the embryonic development, survival and development period of larvae of ridgetail white prawn (*Exopalaemon carinicauda*) reared in the laboratory LIANG Junping, LI Jian, LI Jitao, et al (1142)

Population, Community and Ecosystem

- Diversity of ecosystem services and landscape multi-functionality: from scientific concepts to integrative assessment LÜ Yihe, MA Zhimin, FU Bojie, et al (1153)
- Research on estimating wetland vegetation abundance based on spectral mixture analysis with different endmember model: a case study in Wild Duck Lake wetland, Beijing CUI Tianxiang, GONG Zhaoning, ZHAO Wenji, et al (1160)
- Identifying typical plant ecological types based on spectral characteristic variables: a case study in Wild Duck Lake wetland, Beijing LIN Chuan, GONG Zhaoning, ZHAO Wenji, et al (1172)
- Responses of phytoplankton community to the construction of small hydropower stations in Hainan Province LIN Zhangwen, LIN Sheng, GU Jiguang, et al (1186)
- Diurnal variation of water quality around *Potamogeton crispus* population WANG Jinqi, ZHENG Youfei, WANG Guoxiang (1195)
- Effects of three forest restoration approaches on plant diversity in red soil region, southern China WANG Yun, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua, et al (1204)
- Dynamics of soil physical-chemical properties and organic carbon content along a restoration chronosequence in *Pinus tabulaeformis* plantations HU Huifeng, LIU Guohua (1212)
- Probability models of forest fire risk based on ecology factors in different vegetation regions over China LI Xiaowei, ZHAO Gang, YU Xiubo, et al (1219)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Landscape ecological security dynamics in a fast growing urban district: the case of Dongguan City YANG Qingsheng, QIAO Jigang, AI Bin (1230)
- The difference between exergy and biodiversity in ecosystem health assessment: a case study of Jiangsu coastal zone TANG Dehao, ZOU Xinqing, LIU Xingjian (1240)
- Impacts of drying-wetting cycles on CO₂ and N₂O emissions from soils in different ecosystems OUYANG Yang, LI Xuyong (1251)
- Evaluation of low-carbon competitiveness in Western China JIN Xiaoqin, DU Shouhu (1260)
- Flood return period analysis of the Bayi Reservoir Watershed based on HEC-HMS Model ZHENG Peng, LIN Yun, PAN Wenbin, et al (1268)
- Simulation of rainfall interception process of primary korean pine forest in Xiaoxing'an Mountains by using the modified Gash model CHAI Rushan, CAI Tiju, MAN Xiuling, et al (1276)
- Characteristics of tree-ring chronology of *Pinus koraiensis* and its relationship with climate factors on the northern slope of Changbai Mountain CHEN Lie, GAO Lushuang, ZHANG Yun, et al (1285)

Resource and Industrial Ecology

- Nitrogen flows in "crop -edible mushroom" production systems in Hexi Corridor Oasis Irrigation Area LI Ruiqin, YU Anfen, ZHAO Youbiao, et al (1292)
- Effects of fertilization on soil fertility indices and yield of dry-land peanut WANG Caibin, ZHENG Yaping, LIANG Xiaoyan, et al (1300)
- Effect of tillage and residue management on dynamic of soil microbial biomass carbon PANG Xu, HE Wenqing, YAN Changrong, et al (1308)
- Evaluation of eco-security of cultivated land requisition-compensation balance based on improved set pair analysis SHI Kaifang, DIAO Chengtai, SUN Xiufeng, et al (1317)

Opinions

- Methodology for measuring forestry ecological security based on ecology-industry symbiosis: a research framework ZHANG Zhiguang (1326)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 4 期 (2013 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 4 (February, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元