

干湿交替强度和频率对香菇草—土壤系统 无机氮及净氮矿化的影响*

安菁, 张晓雅, 段牧莹, 丁艳, 蒋丽华, 高俊琴**

(北京林业大学自然保护区学院, 北京 100083)

摘要:【目的】气候变化降水模式改变对自然生态系统的影响已成为生态学研究热点, 本研究旨在探究降水模式改变下干湿交替强度和频率对土壤无机氮及氮矿化的影响。【方法】以香菇草为试验材料开展温室控制试验。试验设置了高、中和低 3 种干湿交替强度和频率共 9 种处理, 测定了土壤铵态氮、硝态氮含量, 分析了土壤净氮矿化和硝化速率。【结果】(1) 干湿交替强度对香菇草—土壤系统的无机氮含量有极显著影响。干湿交替强度最低时, 土壤铵态氮含量最高, 而硝态氮含量最低; 随干湿交替强度增加, 土壤铵态氮含量下降, 硝态氮含量增加。(2) 干湿交替频率对香菇草—土壤系统的无机氮含量有极显著影响。随干湿交替频率增加, 土壤铵态氮含量下降, 而硝态氮含量增加。(3) 干湿交替强度和频率对土壤无机氮及净氮矿化有显著的交互作用。【结论】干湿交替强度和频率的改变导致了香菇草—土壤系统无机氮含量、净氮矿化速率和硝化速率的变化, 影响了土壤中氮素养分的有效性, 进而影响植物—土壤系统氮循环。

关键词: 干湿交替; 香菇草; 硝态氮; 铵态氮; 净氮矿化

中图分类号: Q 142.2; S 152.7 文献标识码: A 文章编号: 1004-390X (2018) 03-0494-06

Effects of Drying-rewetting Intensity and Frequency on the Inorganic Nitrogen and Net Nitrogen Mineralization of *Hydrocotyle Vulgaris*-soil System

AN Jing, ZHANG Xiaoya, DUAN Muying, DING Yan, JIANG Lihua, GAO Junqin

(School of Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Purpose] Effects of altered precipitation patterns on natural ecosystems with climate change has already become a hot topic of ecological study. Our purpose was to reveal the effects of altered precipitation patterns on the inorganic nitrogen (N) and net N mineralization. [Method] We conducted a greenhouse experiment with *H. vulgaris* across three drying-rewetting intensities and frequencies. We analyzed the content of nitrate and ammonium, net N mineralization and nitrification rate of the soils. [Result] (1) Drying-rewetting intensity significantly affected soil inorganic N content of *H. vulgaris*. In the lowest drying-rewetting intensity, the ammonium content was the highest and nitrate content was the lowest than other two treatments. With drying-rewetting intensity increased, ammonium content decreased while nitrate content increased. (2) Drying-rewetting fre-

收稿日期: 2017-11-07

修回日期: 2018-03-22

网络出版时间: 2018-05-23

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0505903); 国家自然科学基金项目(41571084)。

作者简介: 安菁(1991—), 女, 辽宁阜新人, 硕士研究生, 主要从事湿地植被修复与重建方面的研究。

E-mail: Annsilence@126.com

**通信作者 Corresponding author: 高俊琴(1978—), 女, 山西人, 博士, 副教授, 主要从事湿地生态过程、湿地保护与管理等方面的研究。E-mail: gaojq@bjfu.edu.cn

网络出版地址: [http://dx.doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).201711019](http://dx.doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).201711019)

quency significantly affected soil inorganic N content of *H. vulgaris*. With drying-rewetting frequency increased, ammonium content decreased while nitrate content increased. (3) There was a significant interactive effect between drying-rewetting intensity and frequency on soil inorganic N and net N mineralization. [Conclusion] Our results suggested that altered drying-rewetting intensity and frequency can affect N availability and N cycle in plant-soil system, which indirectly affect the soil inorganic N, net N mineralization and nitrification rate of *H. vulgaris*.

Keywords: drying-rewetting; *Hydrocotyle vulgaris*; nitrate nitrogen; ammonium nitrogen; net nitrogen mineralization

气候模型预测未来许多区域极端干旱事件和强降水事件频率将增加^[1-2]。这种极端气候事件导致的降雨模式变化强烈影响着生态系统水分循环,导致土壤表层经历剧烈的干湿交替变化,会在短时间内引起土壤可利用性养分如无机氮含量的变化,影响植物养分吸收进而影响植物生长^[3-5]。

氮主要以有机态形式存在于土壤之中,土壤动物和微生物将土壤有机氮转化为无机氮(铵态氮和硝态氮)之后有利于被植物吸收利用,这个过程称为氮矿化^[6]。土壤氮的转化主要由矿化作用和固持作用控制,无机氮的供应速率和限制性决定了土壤氮有效性,并以净氮矿化速率作为评价指标^[7]。土壤水分是影响土壤净氮矿化的重要因素之一,降水的改变会直接影响土壤含水量的变化,从而影响土壤氮有效性与氮矿化速率^[8]。土壤含水量与土壤氮矿化作用在一定范围内呈现正相关关系^[9-10]。随着土壤含水量的增加土壤净氮矿化率和硝化速率不断增强,土壤中无机氮含量增加,土壤氮有效性增强^[11]。但是,当土壤含水量超过一定范围时,土壤氮矿化作用和硝化作用可能会降低,反硝化作用增强,导致更多的氮素以气态氮的形式散发出去造成氮损失^[12-13]。

研究表明:降水频率改变所引起的土壤干湿交替现象影响土壤氮素矿化以及硝化等^[14-16]。土壤干湿交替能引起土壤水势快速变化,使微生物受到渗透压冲击,导致微生物细胞破裂释放溶质,而这些溶质易被剩余的微生物所利用,从而促进无机氮的生产^[17-18]。同时,微生物大量死亡也降低了微生物对氮的吸收,增加了氮积累。土壤的湿润程度以及持续时间会影响氮矿化率^[19]。研究表明:土壤净氮矿化随着干湿交替湿周期的时长和强度增加而增加,随着干周期的时长和强度增加而降低^[20]。干湿交替频率增加会降低土壤

中硝态氮含量和土壤净氮矿化率,增加土壤铵态氮含量^[21]。干湿交替频率的增加导致土壤反硝化速率增快,导致土壤硝态氮降低^[22]。也有研究表明,干湿交替对土壤氮矿化没有显著影响^[23]。

干湿交替强度与频率对土壤中无机氮以及净氮矿化速率和硝化速率的影响还存在分歧。本研究以香菇草为试验材料,采用温室控制试验的方法,通过设置不同干湿交替强度和频率探究其对土壤无机氮(铵态氮和硝态氮)以及净氮矿化的影响,为深入理解气候变化下土壤可利用性氮素及氮循环提供基础。

1 材料和方法

1.1 试验设计

试验所用的香菇草(*Hydrocotyle vulgaris*)采自于杭州西溪湿地国家公园,后在北京林业大学温室中进行培养。香菇草是一种典型的湿地外来植物,对水分具有较好的耐受性,能较好地抵御水分胁迫,具有表型可塑性^[24-25]。因其外形美观,适应性强,生长繁殖迅速,可盆栽室内观赏,能广泛应用于园艺栽培,是绿化和造景的优良品种^[26]。试验随机选择长势一致的香菇草植株90株,种植于直径30 cm的塑料花盆中,每盆2株。试验土壤选用草炭土和沙土的混合土壤[V(草炭土):V(沙土)=1.5:1],该土壤普遍适用于园艺栽培^[27]。土壤初始水分含量约为30%,有机碳含量为80 mg/g,全氮含量为4.75 mg/g,无机氮含量为2.98 μg/g。以浙江省多年平均降水量为依据^[28-29],设置干湿交替频率为高频率(每3 d浇1次水)、中频率(每6 d浇1次水)和低频率(每9 d浇1次水);干湿交替强度分别为高(每次施水600 mL)、中(每次施水400 mL)和低降水量(每次施水200 mL),共9种处理,每种处理5个重复。

试验于 2015 年 6 月底开始, 持续 60 d。本试验是在北京林业大学科技股份有限公司温室中进行, 试验期间温室室内日均温度为 28.0 °C, 平均湿度为 74.2%。

1.2 样品采集与测定

试验开始时, 收集初始土壤样品 5 份, 用于初始土壤硝态氮和铵态氮含量的测定。试验结束时, 分别收集每盆香菇草土壤, 共 45 份, 立即带回实验室, 进行土壤硝态氮和铵态氮的测定。采样时土壤含水量变化于 10%~45% 之间。土壤硝态氮和铵态氮测定方法如下: 每个土壤样品称取 6 g 鲜土, 加入 0.05 mol/L 的 K_2SO_4 溶液 30 mL, 在振荡机中 120 r/min 振荡 90 min 后, 用抽提机将振荡好的上清液抽提出来放在棕色小瓶中, 置于连续流动分析仪 (德国 SEAL 公司, AA3 型) 上测定。

土壤净氮矿化速率计算如下^[30]:

$$N_{\min} = (N_2 - N_1) / d \quad (1)$$

式 (1) 中, N_{\min} 为净氮矿化率, mg/(kg·d); N_1 为培养前的无机氮量, mg/kg; N_2 为培养后的无机氮量, mg/kg; d 为培养时间, d。

土壤净氮硝化速率计算如下^[31]:

$$N_{\text{nit}} = (N_2' - N_1') / d \quad (2)$$

式 (2) 中, N_{nit} 为净氮硝化速率, mg/(kg·d); N_1' 为培养前的硝态氮量, mg/kg; N_2' 为培养后的硝态氮量, mg/kg; d 为培养时间, d。

1.3 数据分析

采用双因素方差分析 (two-way ANOVAs) 检验不同干湿交替强度和频率对香菇草土壤铵态氮和硝态氮含量的影响。采用 SPSS 20.0 统计软件进行统计分析, 处理间差异显著性 ($P < 0.05$) 经 Turkey 事后检验分析得出。采用 Sigmaplot 12.5

软件作图。

2 结果与分析

2.1 干湿交替强度和频率对香菇草—土壤系统无机氮含量的影响

表 1 表明: 干湿交替强度和频率对香菇草土壤铵态氮、硝态氮和无机氮含量均有显著影响, 且两者交互作用显著 ($P < 0.05$)。干湿交替强度在较低和中等时, 土壤铵态氮含量随着干湿交替频率增加而降低; 干湿交替强度较高时, 干湿交替频率对土壤铵态氮含量没有显著影响 (图 1a)。

3 种干湿交替强度下, 土壤硝态氮含量在干湿交替高频率处理下显著高于中频和低频率干湿交替处理, 而在中等和低频率干湿交替处理下没有显著差异 (图 1b)。干湿交替强度较低时, 干湿交替频率对土壤无机氮含量没有显著影响; 干湿交替强度中等和较高时, 土壤无机氮含量在干湿交替高频率处理下显著高于中频和低频率处理, 而在中等和低频率干湿交替处理下没有显著差异 (图 1c), 这与硝态氮呈现相似的趋势。

2.2 干湿交替强度和频率对香菇草—土壤系统净氮矿化的影响

表 1 表明: 干湿交替强度和频率对香菇草土壤净硝化速率和净氮矿化速率均有极显著影响, 且两者交互作用显著 ($P < 0.05$)。3 种干湿交替强度下, 净硝化速率都是在高干湿交替频率下最高, 中等和低频率下最低; 干湿交替强度中等和较高时, 高频率显著高于中频率和低频率的净硝化速率, 且中频率和低频率下净硝化速率没有显著差异 (图 2a)。干湿交替强度和频率对土壤净氮矿化速率的影响与对净硝化速率的影响一致 (图 2b)。

表 1 干湿交替强度和频率对土壤铵态氮、硝态氮和无机氮含量影响的方差分析

Tab. 1 Effects of drying-rewetting intensity, frequency and their interaction on the contents of nitrate, ammonium and inorganic N by analysis of variance

项目 item		铵态氮 NO ₃ -N	硝态氮 NH ₄ ⁺ -N	无机氮 inorganic N	净硝化速率 net nitrification rate	净氮矿化速率 net N mineralization rate
干湿交替强度 (I) drying-rewetting intensity	$F_{2, 36}$ P	35.27 <0.001	11.90 <0.001	7.22 0.002	11.90 <0.001	7.22 0.002
干湿交替频率 (F) drying-rewetting frequency	$F_{2, 36}$ P	7.11 0.002	98.09 <0.001	88.97 <0.001	98.09 <0.001	88.97 <0.001
I×F	$F_{4, 36}$ P	2.76 0.042	14.88 <0.001	14.80 <0.001	14.88 <0.001	14.80 <0.001

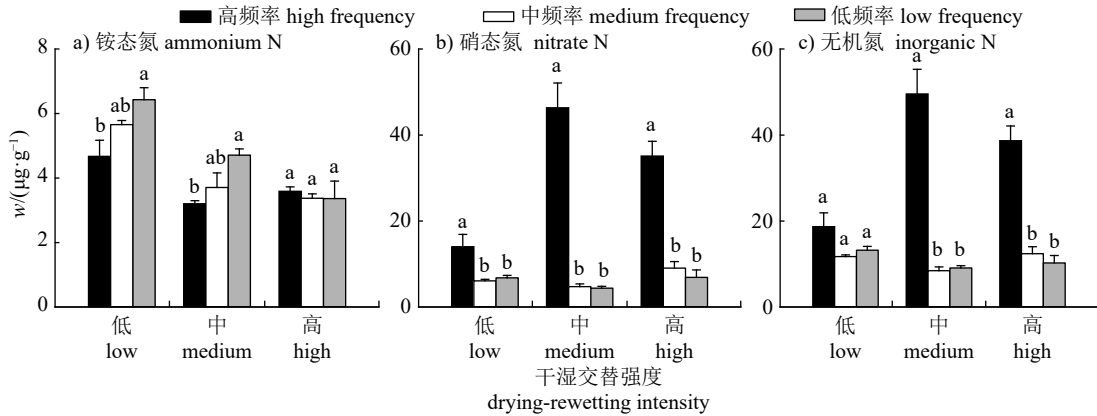


图1 干湿交替强度和频率对香菇草土壤铵态氮、硝态氮和无机氮含量的影响

Fig. 1 Interactive effects of drying-rewetting intensity and frequency on the contents of nitrate, ammonium and inorganic N

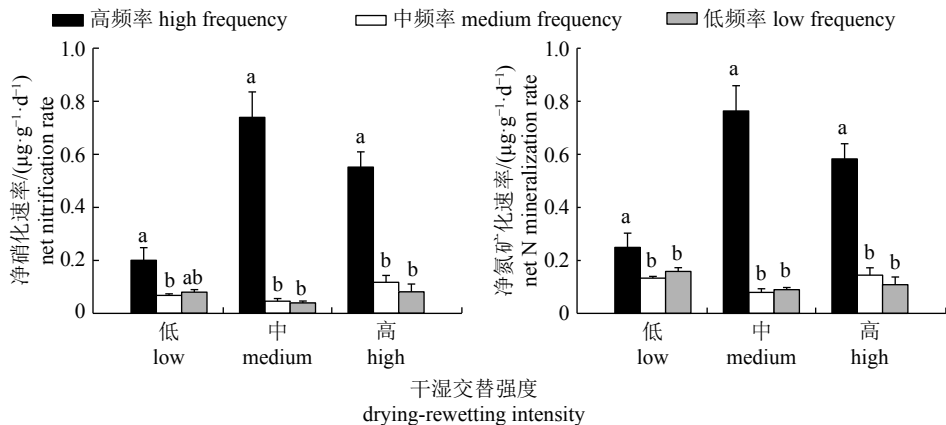


图2 干湿交替强度和频率对香菇草土壤氮矿化的影响

Fig. 2 Effects of drying-rewetting intensity and frequency on soil N mineralization

3 讨论

本研究表明: 干湿交替强度增加显著增加了香菇草土壤无机氮含量, 主要是增加了硝态氮的含量, 而铵态氮含量降低。研究表明: 土壤水分能够影响微生物繁殖及其活性, 并影响土壤有机质的分解, 进而影响土壤氮矿化速率和土壤氮循环^[32]。土壤湿润强度增加可能导致了香菇草土壤微生物生物量的增加且在一定程度上激发了土壤微生物的活性, 促进了微生物对土壤有机质的分解, 导致了净氮矿化速率的增强, 尤其增加了土壤硝态氮含量。研究表明: 植物根系在吸收利用土壤中的无机氮时更偏好于吸收利用铵态氮^[33-34]。随着土壤湿润强度的增加, 香菇草的生长更加旺盛, 需要从土壤中吸收更多的铵态氮供植物生长所用, 这有可能导致香菇草土壤中铵态氮含量的下降。

干湿交替频率增加显著增加了香菇草土壤的

净氮矿化速率和硝化速率, 使土壤中无机氮含量增加, 主要增加了硝态氮含量。有研究认为, 土壤在经历干旱之后进行复水处理能够增加氮矿化速率并降低氮损失^[35]。这可能是由于微生物在处于长期干旱的土壤条件时大多保持为休眠状态, 当经历复水后微生物的活性被激发, 进而导致净氮矿化速率的增加, 土壤中更多的有机质转化为无机氮。而土壤无机氮的积累大多发生在干旱阶段, 因为一方面土壤中离子的扩散能力受到了水分条件的限制, 另一方面由于干旱所导致的土壤微生物数量减少, 以及植物对无机氮的吸收能力的降低也在一定程度上对土壤无机氮的积累起到了积极作用^[36]。本研究结果中, 随着这种干湿交替频率的增强, 土壤净氮矿化速率不断增强, 促使土壤中的有机氮向无机氮转化。干湿交替频率增加会不断改变土壤中微生物的活性状态、土壤水分状况进而导致香菇草土壤中更多的无机氮积

累。水分不断的波动会使土壤微生物细胞渗透压发生变化,细胞破裂并释放出氮源,积累于土壤之中,有利于提高香菇草土壤中的无机氮含量^[37-38]。而长期的水分波动变化逐渐改变了土壤中微生物的结构和功能,使土壤中的微生物逐渐适应水分变化的压力,提高氮利用率,这都可以导致土壤净氮矿化和硝化速率的提高,促使更多的无机氮积累^[39]。香菇草土壤无机氮含量、净氮矿化速率以及净硝化速率均受到干湿交替强度和频率的交互影响,且在中等干湿交替强度和高于干湿交替频率时最高。其原因可能是中等强度下的土壤水分适宜微生物生长繁殖及微生物活性增强,加速了对有机质的矿化和分解,而较高的干湿交替频率又加速了微生物死亡从而释放出大量的氮素^[40]。

4 结论

干湿交替强度和频率对香菇草土壤硝态氮、铵态氮及净氮矿化均有显著的影响。随干湿交替强度增加,土壤铵态氮含量下降,硝态氮含量增加。随干湿交替频率增加,土壤铵态氮含量下降,而硝态氮、无机氮、净硝化速率和净氮矿化速率都呈增加趋势。综上所述,降水变化引起的土壤干湿交替变化能够引起香菇草—土壤系统无机氮含量、净氮矿化速率和硝化速率的改变,影响土壤中氮素养分的有效性,进而影响植物—土壤系统氮循环。

[参考文献]

- [1] MEEHL G A, TEBALDI C. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century [J]. *Science*, 2004, 305(5686): 994. DOI: [10.1126/science.1098704](https://doi.org/10.1126/science.1098704).
- [2] STOCKER T F, QIN D, PLATTNER G K, et al. Contribution of working group I to fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[C]// *Climate change 2013: The physical science basis*. Bern, Switzerland, 2016.
- [3] LEITNER S, MINIXHOFER P, INSELSBACHER E, et al. Short-term soil mineral and organic nitrogen fluxes during moderate and severe drying-rewetting events[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 114: 28. DOI: [10.1016/j.apsoil.2017.02.014](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.02.014).
- [4] WANG Y S, JENSEN C R, LIU F L. Nutritional responses to soil drying and rewetting cycles under partial root-zone drying irrigation[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 179(SI): 254. DOI: [10.1016/j.agwat.2016.04.015](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.04.015).
- [5] 王苑, 宋新山, 王君, 等. 干湿交替对土壤碳库和有机碳矿化的影响[J]. *土壤学报*, 2014, 51(2): 342.
- [6] SCHIMMEL J P, BENNETT J. Nitrogen mineralization: challenges of a changing paradigm[J]. *Ecology*, 2004, 85(3): 591. DOI: [10.1890/03-8002](https://doi.org/10.1890/03-8002).
- [7] 任艳林. 降水变化对樟子松人工林土壤无机氮和净氮矿化速率的影响[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2012, 48(6): 925.
- [8] MA L, GUO C, XIN X, et al. Effects of belowground litter addition, increased precipitation and clipping on soil carbon and nitrogen mineralization in a temperate steppe[J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(11): 7361. DOI: [10.5194/bg-10-7361-2013](https://doi.org/10.5194/bg-10-7361-2013).
- [9] GUNTIÑASAABA M E. Effects of moisture and temperature on net soil nitrogen mineralization: a laboratory study[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2012, 48(1): 73. DOI: [10.1016/j.ejsobi.2011.07.015](https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2011.07.015).
- [10] 柳维扬, 高艳红, 王家强, 等. 水分因素对绿洲荒漠过渡带土壤氮矿化的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(5): 89.
- [11] 陈静, 李玉霖, 冯静, 等. 温度和水分对科尔沁沙质草地土壤氮矿化的影响[J]. *中国沙漠*, 2016, 29(1): 103.
- [12] PALMER K, KÖPP J, GEBAUER G, et al. Drying-rewetting and flooding impact denitrifier activity rather than community structure in a moderately acidic fen[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016, 7(215): 727. DOI: [10.3389/fmicb.2016.00727](https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00727).
- [13] PETRAKIS S, SEYFFERTH A, KAN J J, et al. Influence of experimental extreme water pulses on greenhouse gas emissions from soils[J]. *Biogeochemistry*, 2017, 133(2): 147. DOI: [10.1007/s10533-017-0320-2](https://doi.org/10.1007/s10533-017-0320-2).
- [14] BIRCH H F. The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability[J]. *Plant and Soil*, 1958, 10(1): 9. DOI: [10.1007/BF01343734](https://doi.org/10.1007/BF01343734).
- [15] LUPON A, SABATER F, MIÑARRO A, et al. Contribution of pulses of soil nitrogen mineralization and nitrification to soil nitrogen availability in three mediterranean forests[J]. *European Journal of Soil Science*, 2016, 67(3): 303. DOI: [10.1111/ejss.12344](https://doi.org/10.1111/ejss.12344).
- [16] 张威, 张旭东, 何红波, 等. 干湿交替条件下土壤氮素转化及其影响研究进展[J]. *生态学杂志*, 2010, 29(4): 783.
- [17] MANZONI S, SCHIMMEL J P, PORPORATO A. Responses of soil microbial communities to water stress: results from a meta-analysis[J]. *Ecology*, 2012, 93(4): 930. DOI: [10.1890/11-0026.1](https://doi.org/10.1890/11-0026.1).
- [18] BELL C W, TISSUE D T, LOIK M E, et al. Soil microbial and nutrient responses to 7 years of seasonally altered precipitation in a Chihuahuan Desert grassland[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(5): 1657. DOI: [10.1111/gcb.12418](https://doi.org/10.1111/gcb.12418).
- [19] GUO X B, DRURY C F, YANG X M, et al. The extent of Soil drying and rewetting affects nitrous oxide emissions, denitrification, and nitrogen mineralization[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78(1): 194. DOI: [10.2136/sssaj2013.06.0219](https://doi.org/10.2136/sssaj2013.06.0219).
- [20] MILLER A E, SCHIMMEL J P, MEIXNER T, et al. Epis-

- odic rewetting enhances carbon and nitrogen release from chapparral soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(12): 2195. DOI: [10.1016/j.soilbio.2005.03.021](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.03.021).
- [21] MORILLAS L, DURÁN J, RODRÍGUEZ A, et al. Nitrogen supply modulates the effect of changes in drying-rewetting frequency on soil C and N cycling and greenhouse gas exchange[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(10): 3854. DOI: [10.1111/gcb.12956](https://doi.org/10.1111/gcb.12956).
- [22] NIELSEN U N, BALL B A. Impacts of altered precipitation regimes on soil communities and biogeochemistry in arid and semi-arid ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(4): 1407. DOI: [10.1111/gcb.12789](https://doi.org/10.1111/gcb.12789).
- [23] KRUSE J S, KISSEL D E, CABRERA M L. Effects of drying and rewetting on carbon and nitrogen mineralization in soils and incorporated residues[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, 69(3): 247. DOI: [10.1023/B:FRES.0000035197.57441.cd](https://doi.org/10.1023/B:FRES.0000035197.57441.cd).
- [24] 耿宇鹏, 张文驹, 李博, 等. 表型可塑性与外来植物的入侵能力[J]. *生物多样性*, 2004, 12(4): 447. DOI: [10.3321/j.issn:1005-0094.2004.04.009](https://doi.org/10.3321/j.issn:1005-0094.2004.04.009).
- [25] 缪丽华, 季梦成, 王莹莹, 等. 湿地外来植物香菇草 (*Hydrocotyle vulgaris*) 入侵风险研究[J]. *浙江大学学报 (农业与生命科学版)*, 2011, 37(4): 425. DOI: [10.3785/j.issn.1008-9209.2011.04.011](https://doi.org/10.3785/j.issn.1008-9209.2011.04.011).
- [26] DONG B C, WANG J Z, LIU R H, et al. Soil heterogeneity affects ramet placement of *hydrocotyle vulgaris*[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2015, 8(1): 92. DOI: [10.1093/jpe/rtu003](https://doi.org/10.1093/jpe/rtu003).
- [27] 秦玲, 李嘉瑞, 魏钦平. 草炭及其制剂在园艺栽培中的应用[C]//中国园艺学会青年学术讨论会, 2004.
- [28] 吴昊旻, 姜燕敏, 强玉华. 浙江丽水市降水特征多时间尺度周期变化规律的探究[J]. *干旱气象*, 2012, 30(1): 34. DOI: [10.3969/j.issn.1006-7639.2012.01.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-7639.2012.01.007).
- [29] 逯孝强, 陈永金, 海建航, 等. 浙江省 1951—2013 年气候变化研究[J]. *曲阜师范大学学报 (自然科学版)*, 2016, 42(3): 83.
- [30] KNOEPP J D, SWANK W T. Using soil temperature and moisture to predict forest soil nitrogen mineralization[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 36(3): 177. DOI: [10.1007/s00374-002-0536-7](https://doi.org/10.1007/s00374-002-0536-7).
- [31] GLOSER V, JE ÍKOVÁ M, LÜSCHER A, et al. Soil mineral nitrogen availability was unaffected by elevated atmospheric pCO₂ in a four year old field experiment (Swiss FACE)[J]. *Plant and Soil*, 2000, 227(1/2): 291. DOI: [10.1023/A:1026538213199](https://doi.org/10.1023/A:1026538213199).
- [32] FUJITA Y, VAN BODEGOM P M, VENTERINK H O, et al. Towards a proper integration of hydrology in predicting soil nitrogen mineralization rates along natural moisture gradients[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013, 58(2): 302. DOI: [10.1016/j.soilbio.2012.12.013](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.12.013).
- [33] KRONZUCKER H J, GLASS A D, YAEESH S M. Inhibition of nitrate uptake by ammonium in barley. Analysis of component fluxes[J]. *Plant Physiology*, 1999, 120(1): 283. DOI: [10.1104/pp.120.1.283](https://doi.org/10.1104/pp.120.1.283).
- [34] 刘婷, 尚忠林. 植物对铵态氮的吸收转运调控机制研究进展[J]. *植物生理学报*, 2016, 52(6): 799.
- [35] CANARINI A, DIJKSTRA F A. Dry-rewetting cycles regulate wheat carbon rhizodeposition, stabilization and nitrogen cycling[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, 81: 195. DOI: [10.1016/j.soilbio.2014.11.014](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.11.014).
- [36] AUSTIN A T, YAHDJIAN L, STARK J M, et al. Water pulses and biogeochemical cycles in arid and semiarid ecosystems[J]. *Oecologia*, 2004, 141(2): 221. DOI: [10.1007/s00442-004-1519-1](https://doi.org/10.1007/s00442-004-1519-1).
- [37] FIERER N, SCHIMEL J P, HOLDEN P A. Influence of drying-rewetting frequency on soil bacterial community structure[J]. *Microbial Ecology*, 2003, 45(1): 63. DOI: [10.1007/s00248-002-1007-2](https://doi.org/10.1007/s00248-002-1007-2).
- [38] XIANG S R, DOYLE A, HOLDEN P A, et al. Drying and rewetting effects on C and N mineralization and microbial activity in surface and subsurface California grassland soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40(9): 2281. DOI: [10.1016/j.soilbio.2008.05.004](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.05.004).
- [39] BORKEN W, MATZNER E. Reappraisal of drying and wetting effects on C and N mineralization and fluxes in soils[J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(4): 808. DOI: [10.1111/j.1365-2486.2008.01681.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01681.x).
- [40] YAN N, MARSCHNER P, CAO W H, et al. Influence of salinity and water content on soil microorganisms[J]. *International Soil & Water Conservation Research*, 2015, 3(4): 320. DOI: [10.1016/j.iswcr.2015.11.003](https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.11.003).

责任编辑: 何承刚