

干湿交替程度对土壤速效养分的影响

张泽洲, 王冬梅, 李梦寻

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要: 降雨和灌溉引起的干湿交替显著影响土壤速效养分的转化和迁移。为了探究干湿交替程度对土壤速效养分的影响, 采用室内模拟干湿交替试验, 设置轻度 (DW1, 复水至 60% WHC)、中度 (DW2, 复水至 45% WHC)、重度 (DW3, 复水至 30% WHC) 3 种干湿交替程度, 并以恒湿处理 (CM, 恒定 60% WHC) 为对照, 探究试验前后土壤 pH、水溶性有机碳 (dissolved organic carbon, DOC)、铵态氮、硝态氮、速效磷及速效钾的变化。结果表明: DW1 土壤 pH 比其他各组低 0.25~0.45, 其余各组间差异不显著; 培养后 CM 组 DOC 下降 20.01%, DW 组下降 37.04%~41.36%, 不同程度干湿交替处理间差异不显著。土壤铵态氮含量在培养后下降 18.19%~42.02%, 各处理间表现为 DW3>DW2>DW1; 土壤硝态氮含量较培养前急剧增长, 表现为 DW1>DW2>DW3, DW2 的铵态氮和硝态氮含量与 CM 组基本一致。土壤速效钾和速效磷培养前后变化不大, 但 DW2 速效磷含量较其他各处理减少 2.93~4.00 mg/kg, 而 DW3 的速效钾含量较其他各处理减少 3.69~14.72 mg/kg。干湿交替显著降低土壤 DOC 和铵态氮含量, 增加土壤硝态氮含量, 对土壤 pH、速效磷、速效钾影响不大。干湿交替程度的增强能提高土壤 pH, 促进铵态氮的产生, 抑制硝态氮和速效钾的生成, 但对 DOC 和速效磷影响不大。

关键词: 干湿交替程度; 速效养分; 水溶性有机碳

中图分类号: S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)02-0265-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.02.035

Effect of Drying-rewetting Intensity on Soil Nutrient Availability

ZHANG Zezhou, WANG Dongmei, LI Mengxun

(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: Drying and rewetting cycles caused by rainfall and irrigation influence the availability of soil nutrient. In order to estimate the effects of drying-rewetting intensity on nutrient availability, three moisture treatments (rewetting to 60%, 45% and 30% WHC) were designed in this study compared with a constantly moist control (CM, 60% WHC during the whole incubation period). The pH of DW1 (rewetting to 60% WHC) was 0.25~0.45 lower than other treatments while the differences among other treatments were not significant. After incubation, the DOC in CM decreased by 20.01%, while decreased by 37.04%~41.36% in drying-rewetting treatments, and there were no significant differences among different intensities. The ammonium nitrogen decreased by 18.19%~42.02% in the drying-rewetting treatments, but the reduction came down with the increasing intensity. The nitrate nitrogen increased sharply in each treatment but the increase came down with the increasing intensity. The ammonium nitrogen and nitrate nitrogen in DW2 (rewetting to 45% WHC) were consistent with CM. Available P and available K had little change after the incubation, but available P in DW2 was lower than other treatments as well as available K in DW3 (rewetting to 30% WHC). Drying-rewetting cycles led to a reduction of DOC and ammonium nitrogen and an increase of nitrate nitrogen but had little effect on pH, available P and available K. Following the growth of drying-rewetting intensity, soil pH and ammonium nitrogen gradually increased, while nitrate nitrogen and available K decreased.

Keywords: drying-rewetting intensity; nutrient availability; DOC

收稿日期: 2020-10-21

资助项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目 (2012BAC16B03); 宁夏回族自治区水利厅科技项目 (2012-69)

第一作者: 张泽洲 (1995—), 男, 在读博士研究生, 主要从事水土保持生态修复研究。E-mail: zezhou1995@163.com

通信作者: 王冬梅 (1963—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: dmwang_bjfu@126.com

土壤速效养分是指可被植物直接吸收利用的土壤养分,它代表土壤养分的供应强度,速效钾、速效磷、速效氮是变化最大的几类基本元素^[1]。这些速效养分的含量随土壤水分的变化发生变化,而水分变化尤为强烈的干湿交替过程对速效养分的影响更为显著^[2]。干湿交替改变土壤结构^[3],影响土壤团聚体的破裂与重组过程,从而影响被团聚体包裹的速效养分的释放与吸附^[4-5]。微生物是土壤中最活跃的部分,对土壤养分的转化分解起着重要的作用,干湿交替影响微生物的生长繁殖过程,改变微生物的群落结构、数量、活性及抗逆性等,从而进一步影响土壤养分的矿化过程^[6]。这些过程都直接导致土壤中速效养分含量的变化,决定着土壤的供肥能力。另外,干湿交替还会导致土壤发生“Birch”效应^[7],即土壤经历干湿交替,团聚体破裂^[8],被包裹的有机质底物释放增多,土壤中水溶性有机碳(DOC, dissolved organic carbon)含量增多^[9-10],但与此同时,微生物也由休眠状态恢复并进一步增生繁殖,加速 DOC 被利用,土壤呼吸速率急剧增加,导致 CO₂ 排放也急剧增加^[11]。干湿交替显著影响土壤 DOC 的转化过程,但对于干湿交替后土壤 DOC 的含量是增是减,前人^[5]研究结果并不一致。

根据 IPCC(2014)的报告,未来全球气候的主要发展趋势为平均气温不断升高,水循环过程加剧,降雨过程变的越来越不规律,导致地表土壤经历的干湿交替过程也变得复杂化,具体表现为复水程度多变,干旱周期不定^[12],干湿交替环境对土壤速效养分及 DOC 的影响也更加复杂。速效养分关乎植物的生长,DOC 则显著影响微生物的活动,植物和微生物又是影响土壤生态系统稳定与发展的重要因素,因此有必要研究不同程度干湿交替对土壤速效养分及 DOC 的影响。据此,本研究采用控制试验,室内模拟干湿交替环境,以恒湿条件为对照,设置 3 种不同程度的干湿交替试验,以探究不同程度干湿交替对土壤 pH、DOC、铵态氮、硝态氮、速效钾、速效磷的影响,为干湿交替环境下土壤养分有效性研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 土样采集

供试土壤采自北京市西山试验林场(39°58′16.9″N, 116°11′08.0″E),在 1 个面积为 10 m×10 m 的样地内选取 5 个样点,剥离表层植被及枯落物层后采集 0—10 cm 土壤,将各样点土样混合后带回实验室风干并过 2 mm 筛,筛除石块和根系等植物残体,处理后的土壤作为供试土壤,基础理化性质与前人^[2]研究一致,土壤容重 1.10 g/cm³,沙粒(>0.05 mm)含量 34%,粉粒(0.002~0.05 mm)含量 48%,黏粒(<0.002 mm)含量 18%,土壤 pH 为 7.03。

1.2 试验设计

试验测得土壤田间持水量(WHC, water holding capacity)约为 33%(质量含水率),根据 Hsiao^[13] 本试验设置 3 个不同程度的干湿交替,即轻度干湿交替(DW1,将土壤复水至 60% WHC)、中度干湿交替(DW2,将土壤复水至 45% WHC)、重度干湿交替(DW3,将土壤复水至 30% WHC),并设置含水量恒定为 60% WHC 的对照组 CM(constantly moist treatment)。一次干湿交替是指从复水开始风干一段时间到下次复水之前的过程,本试验所有干湿交替处理都经历 4 次干湿交替过程,恒湿处理的培养时间与干湿交替处理保持一致,具体过程见图 1。

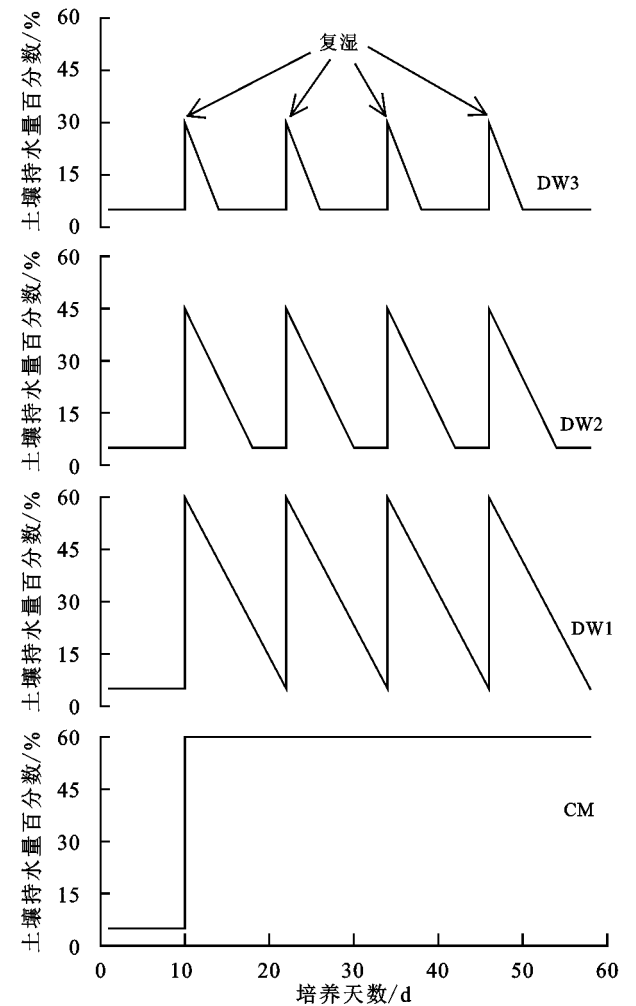


图 1 干湿交替程度设置

试验于 2016 年 9—11 月在北京林业大学水土保持实验室进行。采用广口瓶进行土壤培养,每个瓶中放置 50 g 风干土并保证均匀铺平瓶底,用纱布覆盖瓶口,放置于培养箱中恒温 25 ℃ 培养,每天光照 12 h,每 24 h 揭开纱布进行通风处理。试验共进行 58 天,前 10 天为预培养期,将所有土样放置于培养箱后,不添加蒸馏水,保持土壤风干状态,让各处理中土壤环境状态达到一致。后 48 天为试验期,在第 11 天复水至指定含水量,之后对照组保持水分恒定,每 24

h 进行 1 次补水, 试验组进行干湿交替处理, 即在每次干湿交替的开始一次性复水至指定含水量, 之后在培养条件下自然风干 12 天。每个处理均设置 3 个重复, 具体土壤复水操作及时间见图 1。复水操作采用质量称重法确定每个处理的复水量, 用喷壶将蒸馏水均匀喷洒于土样表面。土壤培养结束后(第 59 天)对每个广口瓶进行破坏性取土, 将每个瓶中所有土壤取出装入塑封袋后置于 4℃ 冰箱冷藏, 并在 48 h 内进行各项指标测定。

1.3 指标测定与数据分析

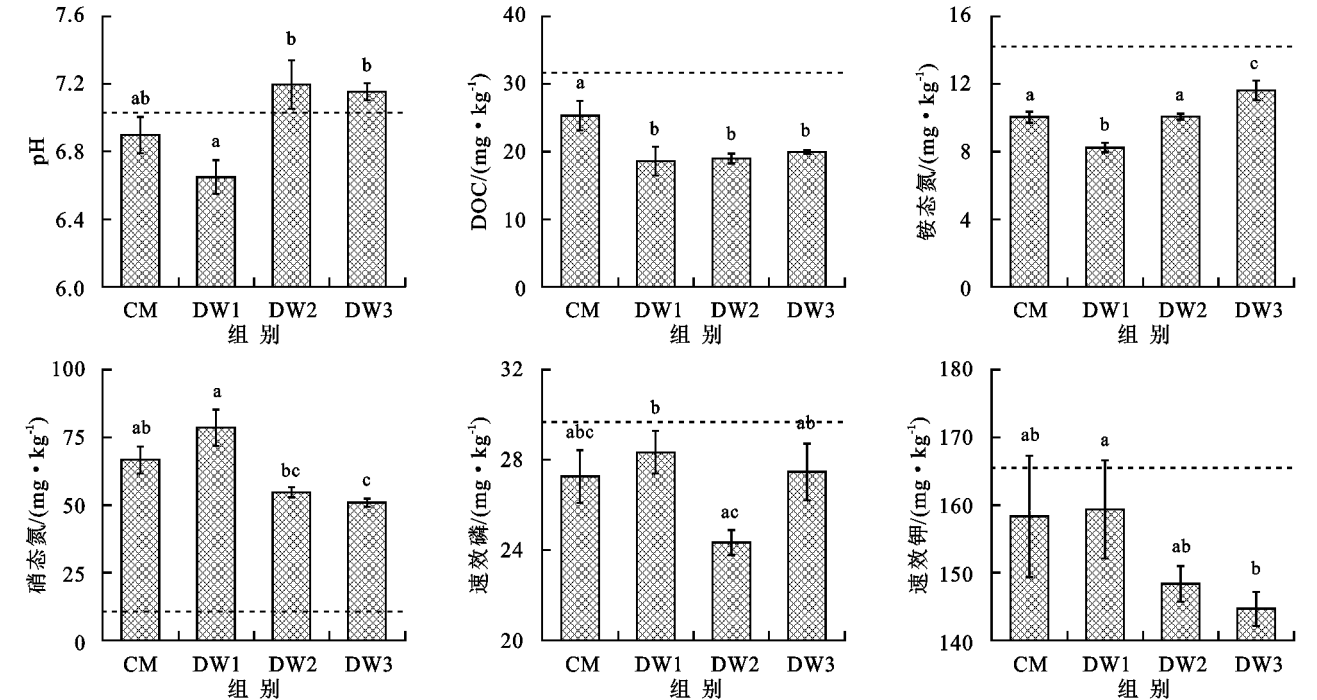
土壤 pH 采用 1 : 2.5 土水比溶液经 pH 计测量; 土壤 DOC 采用 2 : 1 水土比振荡浸提 30 min, 将上清液过 0.45 μm 膜并酸化后用 Liqui TOC-Analyzer 总有机碳分析仪测定; 土壤硝态氮和铵态氮分别采用 KCl 溶液浸提后用 Smartchem 全自动化学分析仪测量; 土壤速效磷采用 NaHCO₃ 溶液浸提后用 Smartchem 全自动化学分析仪测量; 土壤速效钾采用乙酸铵溶液浸提后用火焰光度计进行测量。

采用 SPSS 18.0(Chicago, USA) 软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA), 并用 LSD 法进行多重比较; 用 Spearman 法分析相关关系, 用 Excel 2016 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 干湿交替对土壤 pH 和 DOC 的影响

从图 2 可以看出, 土壤 pH 经干湿交替处理后,



注: 虚线代表处理前的水平, 柱状图为各处理后水平。不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。组别中 DW1、DW2、DW3 代表轻度、中度、重度干湿交替处理, CM 代表恒湿处理。

图 2 干湿交替与恒湿处理 pH、DOC 和速效养分含量

各组硝态氮含量在处理 after 急剧增高(表 1), CM 组增长 5.32 倍($P < 0.01$), DW 组平均增长 4.73 倍

($P<0.01$), DW1、DW2 和 DW3 组分别增长 6.45, 4.19, 3.82 倍($P<0.01$)。由图 2 可知, 各干湿交替组中除 DW1 比 CM 组高 11.90 mg/kg($P<0.01$)外其余 2 组与 CM 无显著差异, DW1 比 DW2 和 DW3

组分别高 23.84, 27.72 mg/kg($P<0.01$)。处理后各组硝态氮含量升高, 但增量随干湿交替程度的增强逐渐降低, 恒湿水平介于轻度与中度干湿交替处理之间。

表 1 土壤 pH、DOC 及速效养分处理前后恒湿组和干湿交替组均值的变化

组别	pH	DOC/ (mg · kg ⁻¹)	硝态氮/ (mg · kg ⁻¹)	铵态氮/ (mg · kg ⁻¹)	速效磷/ (mg · kg ⁻¹)	速效钾/ (mg · kg ⁻¹)
处理前	7.03±0.02a	31.68±2.54a	10.54±0.38a	14.20±0.29a	29.68±1.10a	175.47±3.57a
DW 组均值	6.99±0.08a	19.32±0.43b	60.38±3.57b	9.97±0.39b	26.71±0.67a	160.92±3.10a
CM	6.90±0.11a	25.32±2.15c	66.68±5.00b	10.03±0.32b	27.26±1.16a	168.31±9.00a

注: 表中数据为均值±标准误; DW 组均值为 DW1、DW2、DW3 3 组数据求算术平均值; CM 为恒湿组; 同列不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。

2.3 干湿交替对土壤速效磷和速效钾的影响

CM 组土壤速效磷处理前后变化不大(表 1), 干湿交替组中除 DW2 显著降低 18.03%($P<0.01$), 其余 2 组变化不显著。处理后土壤中速效磷含量 DW2 比 DW1 组低 4.00 mg/kg($P<0.01$)(图 2)。土壤速效钾变化与速效磷相似, 与处理前相比, 各组水平除 DW3 下降 11.87%($P<0.05$), 其余变化不显著。不同程度干湿交替处理间, DW3 比 DW1 低 14.72 mg/kg($P<0.05$)。土壤速效钾含量在恒湿状态下基本不发生变化, 但随干湿交替程度的增强逐渐降低。

2.4 相关性分析

对土壤 pH、DOC 和速效养分进行 Spearman 相关性分析(表 2), 结果显示, 土壤硝态氮与 pH 和 DOC 均呈极显著负相关($P<0.01$); 铵态氮与 pH 和 DOC 均呈极显著正相关($P<0.01$), 与硝态氮呈极显著负相关($P<0.01$); 速效磷与 pH 呈极显著负相关($P<0.01$), 与 DOC 显著负相关($P<0.05$); 土壤 DOC 与 pH 显著正相关($P<0.05$); 速效钾与 pH、DOC 及其他速效养分无显著相关性。

表 2 土壤 pH、DOC 及速效养分的相关性分析

土壤性质	pH	DOC	硝态氮	铵态氮	速效磷	速效钾
pH	1					
DOC	0.549 *	1				
硝态氮	-0.742 **	-0.695 **	1			
铵态氮	0.728 **	0.698 **	-0.935 **	1		
速效磷	-0.666 **	-0.463 *	0.263	-0.124	1	
速效钾	0.317	0.425	-0.350	0.224	-0.204	1

注: * 表示显著性水平为 0.05; ** 表示显著性水平为 0.01。

3 讨论

3.1 干湿交替对土壤 DOC 的影响

土壤 DOC 是可以直接被微生物利用的有机碳源, 是土壤有机质分解的产物, 主要通过土壤异养呼吸消耗, 干湿交替能激发土壤呼吸过程, 从而促进土

壤 DOC 的消耗速率^[7]。Beare 等^[11]在研究中发现, 非压实的土壤在经历干湿交替和恒湿处理后 DOC 明显降低, 本试验所用土壤为过 2 mm 筛的风干土, 基本状况与非压实土壤相近, 所以结论也与其研究相一致, 处理后, DOC 含量下降 20%~40%, 这可能是因为过筛土壤本身结构松散, 团聚体较为细碎, 干湿交替导致土壤团聚体破裂释放的 DOC 不及微生物呼吸被激发消耗的 DOC 含量, 因此整体呈现下降趋势。与恒湿处理相比, 干湿交替对微生物的扰动更大, 被激发的微生物随着土壤水分的频繁变化产生一定的耐性^[13], 可以保持相对的数量和活性, 甚至有可能超过水分条件较为稳定的恒湿处理, 导致 DOC 的消耗超过恒湿水平, 结果表现出 DOC 含量干湿交替处理明显少于恒湿水平的状况, 这与一些研究^[4, 12]相一致。本试验中, 不同程度干湿交替处理间土壤 DOC 含量差异不显著, 这与 Fierer 等^[12]研究结果一致, 但也有学者^[14-15]持不同观点, 可能是因为前人研究虽然也设计了不同程度的干湿交替, 但有些是以土壤复水量风干至指定值的时间定为干湿交替周期, 由于每个程度达到风干的时间并不一致, 因此其周期并不一致, 在相同的试验时间内, 每种程度经历的干湿交替次数也不一致, 而干湿交替次数对土壤 DOC 的影响也较为显著^[2], 本试验中所有干湿交替处理经历的次数一致, 更能证明不同程度的干湿交替对 DOC 的影响。

3.2 干湿交替对土壤速效氮的影响

土壤速效氮主要包括铵态氮、硝态氮和亚硝态氮 3 种形态, 分别通过氨化作用、硝化作用及反硝化作用转化而来^[11]。反硝化过程一般在厌氧或少氧环境中发生, 本试验土壤孔隙度较高, 且最高水分含量不足以填满所有孔隙, 因此反硝化过程可以忽略不计。干湿交替过程中复水能激发硝化过程相关微生物活性^[16], 频繁的干湿扰动又能增强微生物的耐受性, 因此整个干湿交替过程能促进硝化反应, 导致硝态氮含

量的增长。同样干湿交替过程也能促进氨化反应,造成铵态氮的大量生成,但在有氧环境下,铵态氮极不稳定,很容易被氧化为硝态氮^[12]。前人^[7]研究发现,土壤中铵态氮含量与土壤总氮含量及氨化速率并无直接关系,而受氧气环境、土壤 pH 等影响较大。本研究中,经干湿交替培养后硝态氮含量显著增长,铵态氮降低,这与大部分研究^[11,14,17]结果相一致,Yao 等^[17]在研究中发现,硝态氮的含量在经干湿交替培养后更是达到惊人的 40 倍之多;Beare 等^[11]研究发现,土壤硝态氮的增长量基本与铵态氮的降低量一致,但本研究发现,硝态氮的增长量远大于铵态氮的降低量,这可能是由于 Beare 等^[11]的试验只经历了 1 次干湿交替,而本研究的培养经历了 4 次,时间较长,增长的硝态氮中大部分是由被激发生成的铵态氮转化而来,而随着硝态氮的大量生成,土壤 pH 降低,硝化势提升^[2],又进一步促进了硝化过程,不仅将激发过程转化而来的铵态氮硝化,而且还硝化了一部分原土壤中的铵态氮。各处理间随干湿交替程度的增强,土壤平均水分含量减少,激发反应的时间也缩短,生成的硝态氮逐渐降低,硝化势也逐渐降低,因此总硝态氮含量逐渐降低,铵态氮逐渐升高,这与大部分研究^[18]结果相一致。

3.3 干湿交替对土壤速效磷和速效钾的影响

土壤磷在生物地球化学循环过程中几乎没有气体参与,主要去向为淋溶流失及植物吸收^[19],本研究不存在这些过程,因此土壤总磷含量基本不会发生变化,但土壤磷在土壤中存在的形态却受干湿交替影响而发生变化,尤其是土壤速效磷,土壤速效磷主要以磷酸根形式存在,但一般含量较低^[20]。有研究^[19-21]发现,经历干湿交替后,土壤团聚体发生破裂,释放出闭蓄态磷,但多为溶解性较低的有机态磷,而微生物受干湿交替影响,活性激发,数量增长,释放出磷酸酶促进有机磷转化为可溶性无机磷,但本试验中土壤为过筛土,团聚体粒径较小,其受扰动释放的有机磷含量较低,这导致了可被微生物利用并分解为速效磷的量有限,因此这部分释磷过程对土壤速效磷含量影响不大。通过相关性分析发现,土壤速效磷与土壤 pH 呈极显著负相关,这与大部分研究^[21-22]结果一致,干湿交替前后各处理土壤 pH 变化不大,因此土壤速效磷在各处理中也变化不大。王光火等^[22]研究发现,土壤偏酸性,磷酸根易与铁、铝、锰等元素结合形成沉淀,当 pH>6 时,磷酸根开始与钙离子结合形成磷酸钙沉淀,且随着 pH 的升高,结合作用越强,溶液中磷酸根含量越低^[22],本试验中所有土壤 pH 均大于 6,

且中度干湿交替 pH 最高,其速效磷含量最低,轻度干湿交替土壤 pH 最低,其速效磷含量最高。

土壤中的钾主要有矿物质结构形态、非交换态、可交换态和溶解态 4 种^[23],一般短周期内土壤中的速效钾主要受溶解态和可交换态钾影响较大^[23-24],可交换态钾的释钾过程是可逆的,丛日环等^[24]研究发现,干湿交替对土壤速效钾的影响不大,但土壤含水量对速效钾的影响较强,土壤干燥时,固钾过程占优势^[25],这与本研究的结果相一致,重度干湿交替平均水分含量低于恒湿处理及其他 2 组干湿交替处理,其速效钾含量在培养后显著低于其他各组。

4 结论

(1)土壤经历干湿交替,DOC 下降 37.04%~41.36%,铵态氮下降 18.19%~42.02%,硝态氮增长 3.82~6.45 倍,说明干湿交替有利于土壤 DOC 和铵态氮的分解转化,促进硝态氮的生成过程,但对磷和钾的有效性无显著影响。

(2)干湿交替程度对土壤 DOC 影响不大,但对速效养分影响显著。轻度干湿交替更有利于土壤酸化,能促进硝态氮的大量生成,而重度干湿交替更有利于铵态氮的稳定。

(3)中度干湿交替各土壤速效养分基本与恒湿处理一致,说明在农业灌溉中采用中度的复水量能在节约用水的情况下保证养分的有效性。

参考文献:

- [1] Tian L M, Zhao L, Wu X D, et al. Variations in soil nutrient availability across Tibetan grassland from the 1980s to 2010s[J]. *Geoderma*, 2019, 338: 197-205.
- [2] 李梦寻,王冬梅,任远,等.不同干湿交替频率对土壤速效养分、水溶性有机碳的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(5): 1542-1549.
- [3] Kaiser M, Kleber M, Berhe A A. How air-drying and rewetting modify soil organic matter characteristics: An assessment to improve data interpretation and inference [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 80: 324-340.
- [4] Shi A D, Marschner P. Drying and rewetting frequency influences cumulative respiration and its distribution over time in two soils with contrasting management[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 72: 172-179.
- [5] Zhao Y, Maio M D, Vidotto F, et al. Influence of wet-dry cycles on the temporal infiltration dynamic in temperate rice paddies[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 154: 14-21.
- [6] Chowdhury N, Nakatani A S, Setia R, et al. Microbial activity and community composition in saline and non-

- saline soils exposed to multiple drying and rewetting events[J]. *Plant and Soil*, 2011, 348(1/2): 103-113.
- [7] Unger S, Máguas C, Pereira J S, et al. The influence of precipitation pulses on soil respiration-Assessing the “Birch effect” by stable carbon isotopes[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(10): 1800-1810.
- [8] Harrison-Kirk T, Beare M H, Meenken E D, et al. Soil organic matter and texture affect responses to dry/wet cycles: Effects on carbon dioxide and nitrous oxide emissions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 57: 43-55.
- [9] Navarro-García F, Casermeiro M Á, Schimel J P. When structure means conservation: Effect of aggregate structure in controlling microbial responses to rewetting events[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 44(1): 1-8.
- [10] Bravo-Garza M R, Voroney P, Bryan R B. Particulate organic matter in water stable aggregates formed after the addition of ^{14}C -labeled maize residues and wetting and drying cycles in vertisols[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(6): 953-959.
- [11] Beare M H, Gregorich E G, St-Georges P. Compaction effects on CO_2 and N_2O production during drying and rewetting of soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(3): 611-621.
- [12] Fierer N, Schimel J P. Effects of drying-rewetting frequency on soil carbon and nitrogen transformations[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(6): 777-787.
- [13] Hsiao T C. Plant responses to water stress[J]. *Plant Physiology*, 1973, 24(5): 519-570.
- [14] Muhr J, Franke J, Borken W. Drying-rewetting events reduce C and N losses from a Norway spruce forest floor[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(8): 1303-1312.
- [15] Lopez-Sangil L, Rovira P, Casals P. Decay and vertical reallocation of organic C, and its incorporation into carbonates, in agricultural soil horizons at two different depths and rewetting frequencies[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 61: 33-44.
- [16] Dinh M, Guhr A, Weig A R, et al. Drying and rewetting of forest floors: Dynamics of soluble phosphorus, microbial biomass-phosphorus, and the composition of microbial communities[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2018, 54(6): 761-768.
- [17] Yao S, Zhang B, Hu F. Soil biophysical controls over rice straw decomposition and sequestration in soil: The effects of drying intensity and frequency of drying and wetting cycles[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(3): 590-599.
- [18] 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): 3854-3863.
- [19] Rupp H, Meissner R, Leinweber P. Plant available phosphorus in soil as predictor for the leaching potential: Insights from long-term lysimeter studies[J]. *Ambio*, 2018, 47: 103-113.
- [20] Alamgir M, Marschner P. Short-term effects of application of different rates of inorganic P and residue P on soil P pools and wheat growth[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2013, 176(5): 696-702.
- [21] Richardson A E, Simpson R J. Soil microorganisms mediating phosphorus availability update on microbial phosphorus[J]. *Plant Physiology*, 2011, 156(3): 989-996.
- [22] 王光火, 朱祖祥. pH 对土壤吸持磷酸根的影响及其原因[J]. *土壤学报*, 1991, 28(1): 1-6.
- [23] 姜子绍, 宇万太. 农田生态系统中钾循环研究进展[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(3): 3545-3550.
- [24] 丛日环, 李小坤, 鲁剑巍, 等. 不同水分状况对红壤和黄褐土速效钾含量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(5): 1072-1077.
- [25] Zörb C, Senbayram M, Peiter E. Potassium in agriculture-Status and perspectives[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2014, 171(9): 656-669.