

## 不同施氮水平下土壤的生化性质对干湿交替的响应\*

陈 林<sup>1,2</sup> 张佳宝<sup>1†</sup> 赵炳梓<sup>1</sup> 黄 平<sup>3</sup>

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 401122)

**摘 要** 以中国科学院封丘农业生态试验站水氮耦合长期试验地为研究平台, 采集五个施氮水平(施氮 0、150、190、230、270 kg hm<sup>-2</sup>) 下层 0~20 cm 土壤并测定其土壤肥力参数(土壤 pH、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾、有机碳)。结果表明: 施氮降低了土壤 pH、速效磷、全钾, 增加了全氮、碱解氮、有机碳, 除有机碳随施氮水平的增加而增加外, 其他肥力参数并未随施氮水平的增加而发生规律性变化。土壤经过 0、3、6、10 次干湿交替, 培养 60 d 后测定其生物和化学性质(土壤铵态氮、硝态氮、溶解性有机碳、脲酶活性、脱氢酶活性、微生物生物量碳、土壤基本呼吸)。双因素方差分析显示干湿交替次数对铵态氮、硝态氮、无机氮、溶解性有机碳、脱氢酶活性、微生物生物量碳和土壤基本呼吸均有极显著作用, 而干湿交替次数和施氮水平对除脱氢酶活性以外的其他土壤性质均无交互作用。五个施氮水平下土壤硝态氮、无机氮、溶解性有机碳、脲酶活性、脱氢酶活性和微生物生物量碳均随干湿交替次数增加而增加, 土壤基本呼吸随干湿交替次数增加而降低。高施氮水平(施氮超过 190 kg hm<sup>-2</sup>) 下土壤性质的变异系数更小并能更好地发生聚类。本研究表明当土壤遭遇干湿交替时, 高施氮水平下土壤更能维持其生化性质的稳定。

**关键词** 施氮水平; 土壤肥力; 干湿交替; 生化性质**中图分类号** S158.2 **文献标识码** A

干旱、半干旱、季节性干旱地区的表层土壤经常遭遇迅速干旱和湿润的交替影响, 干湿交替是这些地区普遍存在的一种环境压力<sup>[1]</sup>。

干湿交替过程影响土壤碳氮的周转。风干土迅速变湿使得碳氮的矿化率增加<sup>[2]</sup>, 这是由于团聚体破碎并释放出闭蓄态有机物<sup>[3]</sup>、微生物细胞溶解<sup>[4]</sup>、渗透调节物质的分泌<sup>[5]</sup>等提高了基质的有效性。湿土迅速风干会影响土壤的物理结构和生化功能, 随着土壤干旱强度的增加, 刺激微生物提高斥水能力并减少有机质降解, 增加土壤结构稳定性<sup>[6]</sup>。

陆地生态系统的微生物极易受干湿交替的干扰, 其土壤性质的变化很大程度上归因于微生物对干湿压力的响应<sup>[7-8]</sup>。当土壤频繁遭受干湿交替时, 能够耐受干湿压力的微生物(积累或分泌渗透调节物质适应体内外水势的变化)会幸存下来, 不适应者被淘汰, 微生物群落结构可能由此发生变

化<sup>[8]</sup>, 随后土壤微生物生物量和活性也会改变<sup>[9]</sup>。土壤酶活性作为联系微生物和土壤生化性质的有效指标<sup>[10]</sup>, 也容易受干湿交替影响, 例如微生物细胞内的脱氢酶和分泌到胞外的脲酶<sup>[11]</sup>。土壤酶作为微生物新陈代谢的产物是表征土壤微生物活性对干湿响应的敏感指标<sup>[12]</sup>。

黄淮海平原是中国最大的冲积平原及粮食主产区, 属于半干旱地区。该区域全年降雨量分布极不均匀, 降雨(全年降雨量的 60%~70%)多集中在 7-9 月份, 雨后湿润的表层土壤会在几天内迅速干旱, 由此频繁遭遇干湿交替的压力<sup>[13]</sup>。外源氮投入对土壤生化性质有重要影响<sup>[14]</sup>, 而在黄淮海平原, 施氮管理下层土壤频繁遭遇干湿交替后其生化性质如何往往被忽视。因此本研究的对象是六年施氮管理下层 0~20 cm 土壤, 目的是: (1) 评定不同施氮水平下土壤肥力变化; (2) 研究不同施氮

\* 国家重点基础研究发展规划(973 计划)项目(2011CB100506)资助

† 通讯作者: E-mail: jbzhang@issas.ac.cn

作者简介: 陈 林(1987—), 男, 安徽六安人, 博士研究生, 主要从事不同管理模式土壤微生物研究。E-mail: lchen@issas.ac.cn

收稿日期: 2012-08-28; 收到修改稿日期: 2012-12-02

水平下土壤生化性质对于干湿交替的响应。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究以中国科学院封丘农业生态试验站

(114°24'E, 35°01'N) 水氮耦合长期试验地为平台, 该区域属半干旱、半湿润的暖温带季风气候, 年平均温度 13.9℃, 全年降雨量在 615 mm 左右, 蒸发量约 1 875 mm, 全年日照时数 2 300 ~ 2 500 h。该区域土壤起源于黄河冲积沉积物, 属于典型的碱性砂质壤土, 土壤基本性质见表 1。

表 1 供试土壤基本性质

Table 1 Basal properties of the studied soil

深度 Depth (cm)	pH	容重 Bulk density (g cm <sup>-3</sup> )	饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity (mm h <sup>-1</sup> )	阳离子交换量 Cation exchange capacity (cmol kg <sup>-1</sup> )	有机质 Organic matter (g kg <sup>-1</sup> )	砂粒 Sand (%)	粉粒 Silt (%)	黏粒 Clay (%)
0 ~ 30	8.28	1.51	22.6	7.88	10.2	45.6	40.7	13.7
30 ~ 80	8.48	1.48	19.3	14.35	7.1	8.4	55.8	35.9
80 ~ 180	8.95	1.42	18.1	5.27	3.2	7.3	82.4	10.3

### 1.2 田间试验

田间试验始于 2005 年玉米季, 设计五个施氮水平, 即施氮 0、150、190、230、270 kg hm<sup>-2</sup>, 每个施氮水平设三个重复。试验地为施氮水平随机分布的分隔小区, 小区面积 48 m<sup>2</sup> (8 m × 6 m), 试验地四周设置宽 1 m 的保护行, 小区间用水泥板 (宽 10 cm, 深 100 cm) 隔开。

种植方式为小麦和玉米轮作。小麦品种为郑麦 9023, 属弱春性品种, 苗壮, 分蘖力中等, 成穗率高, 每公顷成穗率 525 万株左右, 是当地种植面积最大的品种之一。玉米品种为郑单 958, 属早熟品种, 株形紧凑, 株高 246 cm 左右, 穗长 110 cm 左右, 为当地广为种植的品种之一。

氮肥为尿素 (N 46.3%), 分基肥和追肥两次施入土壤, 其中小麦季基施 40%, 其余 60% 为追肥于返青期施入土壤; 玉米季基施 60%, 其余 40% 为追肥于大喇叭口期施入土壤。基肥均匀施入土壤后翻耕至 20 cm, 小麦季追肥后立即灌溉, 玉米季追肥后如果无降水或降雨量低于 20 mm 立即灌溉。磷肥为重过磷酸钙 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 46.1%), 钾肥为硫酸钾 (K<sub>2</sub>O 49.6%), 磷钾肥每季一次性随氮肥基施, 磷肥为 80 kg hm<sup>-2</sup>, 钾肥为 200 kg hm<sup>-2</sup>。

### 1.3 土壤采集

2011 年玉米季后 (2011-09-20) 采集五个施氮水平下表层 0 ~ 20 cm 土壤。每个小区随机采集 4 个土样, 在去除明显的植物残体和石块后混匀, 风干后测定土壤肥力参数, 随后土壤过 2 mm 筛用于干湿交替培养。

### 1.4 干湿交替培养试验

称取相当于 250 g 烘干重的风干土按容重 1.51 g cm<sup>-3</sup> 填充于 500 ml 塑料瓶中, 用去离子水调节土壤含水量至田间持水量的 60% (用 50 ml 注射器小心喷洒), 随后土壤置于 RP-250C 恒温气候箱 25℃ 预培养 7 d 以恢复土壤生化性质。预培养结束后, 土壤经过 0、3、6、10 次干湿交替处理, 每个处理 3 个重复。一次干湿交替过程为: 一定时间的湿润期后揭开瓶盖, 调节气候箱湿度至最低 (RH 30%) 并维持 3 d, 土壤被风干后 (质量含水量为 1.4% 左右) 随即用去离子水调节土壤含水量至田间持水量的 60%, 盖紧瓶盖并恢复至湿润期培养。土壤干湿交替全过程为 60 d (黑暗下 25℃), 在培养湿润期每天监测土壤含水量并按质量损失补给水分, 干湿交替设计见图 1。

### 1.5 土壤肥力测定

土壤 pH 用 pH 玻璃电极测定 (土水比为 1:2.5), 土壤有机质采用高温外加热重铬酸钾氧化-容量法测定, 全氮和碱解氮分别采用开氏法和碱解扩散法测定, 全磷和速效磷分别采用酸溶-钼锑抗比色法和碳酸氢钠法测定, 全钾和速效钾分别采用氢氟酸-高氯酸消煮法和乙酸铵提取法测定。以上土壤肥力指标的测定均参照鲁如坤<sup>[15]</sup>的方法。

### 1.6 土壤生化性质测定

土壤经 60 d 的干湿交替培养后取出并测定其生化性质。土壤铵态氮和硝态氮用 Skalar SAN<sup>plus</sup> 流动分析仪测定; 溶解性有机碳用 TOC 分析仪 (Multi C/N 3100, Analytik Jena AG, Germany) 测定; 脲酶

活性用 Zantua 和 Bremner<sup>[16]</sup> 的方法测定;脱氢酶活性用 Chu 等<sup>[17]</sup> 的方法测定;微生物生物量碳用氯仿熏蒸 -  $K_2SO_4$  提取<sup>[18]</sup>;浸提液中有有机碳用 TOC 分析仪测定,矫正因子  $k_{EC} = 0.38$ <sup>[19]</sup>;土壤基本呼吸用碱液吸收法测定<sup>[20]</sup>。

### 1.7 统计分析

五个施氮水平分别用符号 N0、N1、N2、N3、N4 表示,四种干湿交替处理分别用 DW0、DW3、DW6、

DW10 表示。

对不同施氮水平下土壤肥力参数作单因素方差分析,比较不同施氮水平下土壤肥力的分异情况。对干湿交替后土壤生化性质作双因素方差分析,研究施氮水平、干湿交替次数及其交互对土壤性质的作用。对土壤性质之间作泊松相关性比较,并对其土壤性质的变异系数作聚类分析。所有数据均采用 SPSS 16.0 统计分析软件处理。

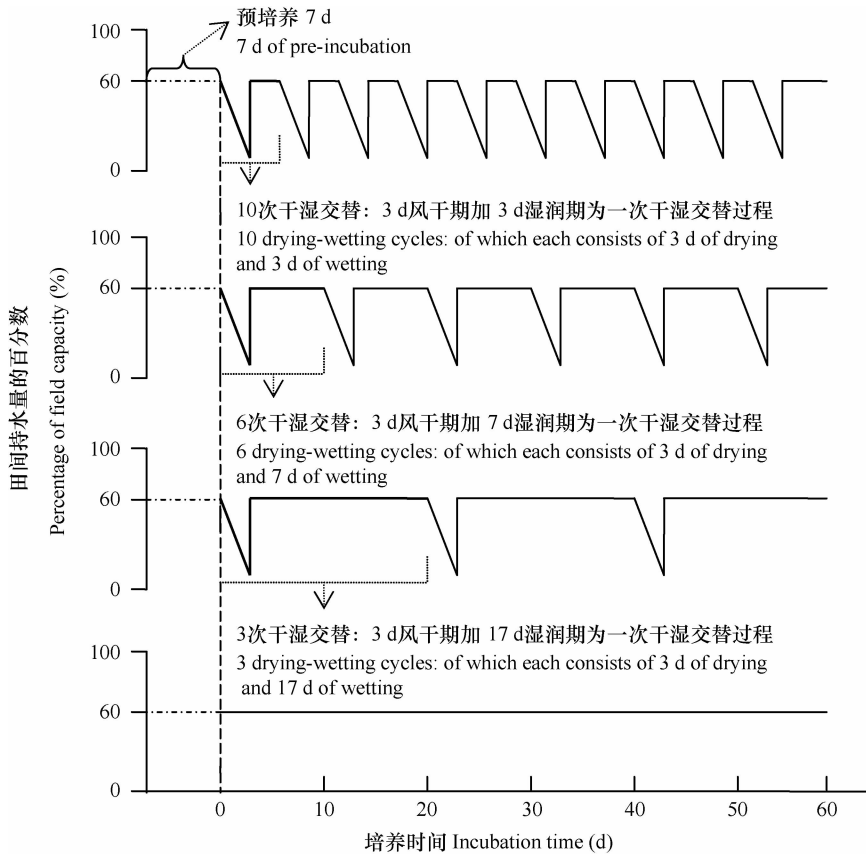


图 1 干湿交替试验设计

Fig. 1 Designing of the drying-wetting alternation experiment

## 2 结 果

### 2.1 不同施氮水平下表层 0~20 cm 土壤的肥力变化

六年的施氮管理对表层 0~20 cm 土壤的肥力产生了一定影响。与未施氮(N0)相比,施氮(N1~N4)降低了土壤 pH,尤其当施氮量达到  $190 \text{ kg hm}^{-2}$  时土壤 pH 明显降低,土壤全氮显著增加了 17.0%~18.9%;尽管土壤碱解氮在不同施氮水平之间无显著差异,但施氮确实提升了土壤碱解氮(较 N0 增加 11.2%~15.8%);土壤全磷在不同施

氮水平之间无显著差异,速效磷因施氮明显降低(较 N0 降低 48.6%~51.4%),全钾也因施氮而有所降低(较 N0 降低 2.4%~8.6%);有机碳因施氮明显增加了 4.0%~13.7%(表 2)。土壤 pH、全氮、碱解氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾均不随施氮量的增加而发生规律性的变化,只有土壤有机碳随施氮量的增加而逐步增加(表 2)。

### 2.2 不同施氮水平下土壤经干湿交替后生化性质的变化

土壤经过干湿交替培养后,其铵态氮含量很低,土壤在 10 次干湿交替后其铵态氮含量大大减少;干湿交

替显著地提升了土壤硝态氮和无机氮,而干湿交替次数对硝态氮和无机氮无显著影响;土壤溶解性有机碳含量随干湿交替次数的增加而逐渐增加(表3)。

施氮土壤经干湿交替培养后,其脲酶活性均有所增加;五个施氮水平下土壤脱氢酶活性和微生物生物量碳均随干湿交替次数的增加而逐渐增加;土壤基本呼吸随干湿交替次数的增加而逐渐降低(表4)。

双因素方差分析表明:施氮水平显著影响土壤硝态氮、无机氮、脲酶活性、脱氢酶活性、微生物生物量碳、基本呼吸,并能解释硝态氮 84.6%、无机氮

84.4%、脲酶活性 46.9%、脱氢酶活性 87.8%、微生物生物量碳 24.2%、土壤基本呼吸 38.5% 的变异,而对铵态氮及溶解性有机碳无显著影响;干湿交替次数对除土壤脲酶活性以外的其他性质均有极显著地影响,并能解释铵态氮 65.4%、硝态氮 75.9%、无机氮 75.3%、溶解性有机碳 60.5%、脲酶活性 23.2%、脱氢酶活性 95.5%、微生物生物量碳 97.5%、土壤基本呼吸 67.7% 的变异;施氮水平与干湿交替次数对除土壤脱氢酶活性以外的生化性质均无显著的交互作用(表3,表4)。

表 2 不同施氮水平下表层 0~20 cm 土壤的肥力变化

Table 2 Fertility of the 0~20 cm soil as affected by nitrogen fertilization rate

施氮水平 Nitrogen fertilization rate	pH	全氮 Total N (g kg <sup>-1</sup> )	碱解氮 Alkalytic N (mg kg <sup>-1</sup> )	全磷 Total P (g kg <sup>-1</sup> )	速效磷 Available P (mg kg <sup>-1</sup> )	全钾 Total K (g kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available K (mg kg <sup>-1</sup> )	有机碳 Organic C (g kg <sup>-1</sup> )
N0	8.46 ± 0.11 a	0.53 ± 0.07 b	47.50 ± 0.01 a	0.82 ± 0.03 a	13.80 ± 0.00 A	21.70 ± 0.76 a	173.0 ± 0.1 a	5.71 ± 1.34 a
N1	8.40 ± 0.12ab	0.56 ± 0.05ab	56.40 ± 0.01 a	0.80 ± 0.06 a	6.90 ± 0.00 B	20.81 ± 0.73ab	102.0 ± 0.0 a	5.94 ± 1.24 b
N2	8.21 ± 0.05 b	0.62 ± 0.03 a	55.50 ± 0.01 a	0.82 ± 0.10 a	7.10 ± 0.00 B	20.68 ± 0.86ab	92.0 ± 0.0 a	5.97 ± 0.87 b
N3	8.32 ± 0.08ab	0.63 ± 0.03 a	53.50 ± 0.00 a	0.82 ± 0.09 a	6.70 ± 0.00 B	21.18 ± 0.33 a	119.0 ± 0.0 a	6.11 ± 0.92 b
N4	8.26 ± 0.04 b	0.62 ± 0.03 a	55.50 ± 0.01 a	0.86 ± 0.10 a	7.00 ± 0.00 B	19.84 ± 0.11 b	190.0 ± 0.1 a	6.49 ± 0.73 b

注: N0、N1、N2、N3、N4 分别表示施氮 0、150、190、230、270 kg hm<sup>-2</sup>, 下同。同列不同大小写字母分别表示 1% 和 5% 水平的差异显著性  
Note: N0, N1, N2, N3 and N4 denotes nitrogen fertilization rate of 0, 150, 190, 230 and 270 kg hm<sup>-2</sup>, respectively, the same below. The different capital and lowercase letters in the same column indicate significant differences at  $p < 0.01$  and  $0.05$ , respectively, based on Duncan's test

表 3 不同施氮水平下土壤经干湿交替后化学性质的变化

Table 3 Changes in chemical properties in soils subjected to drying-wetting alternation as affected by nitrogen fertilization rate

施氮水平 Nitrogen fertilization rate	铵态氮 Ammonium N (mg kg <sup>-1</sup> )				硝态氮 Nitrate N (mg kg <sup>-1</sup> )				无机氮 Inorganic N (mg kg <sup>-1</sup> )				溶解性有机碳 Dissolved organic C (mg kg <sup>-1</sup> )			
	DW0	DW3	DW6	DW10	DW0	DW3	DW6	DW10	DW0	DW3	DW6	DW10	DW0	DW3	DW6	DW10
N0	1.09 b	0.88 ab	1.09 b	0.75 a	88 a	122 b	121 b	119 b	89 a	123 b	122 b	120 b	36.7 a	42.5 b	42.9 b	45.3 c
N1	1.13 b	0.85 ab	1.03 b	0.60 a	116 a	143 b	140 b	146 b	117 a	144 b	141 b	147 b	35.3 a	43.1ab	50.2 b	48.3 b
N2	0.93bc	0.80 b	1.06 c	0.60 a	130 a	144 b	146 b	149 b	131 a	145 b	147 b	150 b	37.9 a	40.6 a	45.5 b	46.0 b
N3	1.01bc	0.77 ab	1.02 c	0.63 a	132 a	149 b	148 b	156 b	133 a	149 b	149 b	156 b	38.8 a	44.5ab	43.3ab	47.7 b
N4	1.02 b	0.78ab	0.81ab	0.61 a	136 a	153 b	156 b	160 b	137 a	154 b	157 b	160 b	39.0 a	41.3ab	44.1 b	47.1 b

双因素方差分析 Two-way ANOVA

施氮水平 Nitrogen fertilization rate(NR)	0.147	0.846 ***	0.844 ***	0.078
干湿交替次数 Number of drying-wetting cycles (NDW)	0.654 ***	0.759 ***	0.753 ***	0.605 ***
施氮水平 × 干湿交替次数 NR × NDW	0.215	0.215	0.211	0.191

注: DW0、DW3、DW6、DW10 分别表示持续湿润、3 次干湿交替、6 次干湿交替、10 次干湿交替。同行不同字母表示在 5% 水平上的差异显著性, \*\*\* 表示 1% 水平上的显著性作用

Note: DW0, DW3, DW6 and DW10 denotes 0, 3, 6 and 10 drying-wetting cycles, respectively. The different letters in the same row indicate significant differences at  $p < 0.05$  based on Duncan's test, and \*\*\* for two-way ANOVA represents significant effect of  $p < 0.001$

表 4 不同施氮水平下土壤经干湿交替后生物性质的变化

Table 4 Changes in biological properties in soils subjected to drying-wetting alternation as affected by nitrogen fertilization rate

施氮水平 Nitrogen fertilization rate	脲酶活性 Urease activity (NH <sub>4</sub> -N. mg g <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )				脱氢酶活性 Dehydrogenase activity ( TPF. mg kg <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )				微生物生物量碳 Microbial biomass C (mg kg <sup>-1</sup> )				土壤基本呼吸 Basal soil respiration (CO <sub>2</sub> -C. mg kg <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )			
	DW0	DW3	DW6	DW10	DW0	DW3	DW6	DW10	DW0	DW3	DW6	DW10	DW0	DW3	DW6	DW10
N0	1.20 a	1.11 a	1.27 a	1.22 a	61.1 a	62.7 a	70.2 b	72.2 b	14.8 a	19.5 b	47.3 c	74.3 d	8.03 a	11.8 b	10.4 b	8.70 a
N1	1.32 a	1.39ab	1.47 b	1.47 b	62.5 a	66.8 b	73.0 c	74.0 c	14.4 a	19.3 a	44.5 b	75.6 c	8.30 a	11.8 b	10.5 bc	9.90 ab
N2	1.40 a	1.46 a	1.56 ab	1.65 b	62.5 a	71.0 b	74.0 c	77.2 d	16.8 a	19.8 a	56.4 b	76.3 c	9.78 a	12.3 b	11.7 b	10.4 a
N3	1.31 a	1.37 a	1.43 a	1.45 a	66.5 a	72.9 b	75.1 c	76.5 c	16.1 a	21.8 a	58.6 b	75.4 c	9.96 a	12.2 c	11.5 bc	10.8 ab
N4	1.32 a	1.41 a	1.44 a	1.45 a	67.5 a	74.1 b	75.7 bc	76.6 c	17.2 a	20.6 a	59.0 b	79.7 c	9.92 a	12.6 b	11.8 ab	11.0 ab
双因素方差分析 Two-way ANOVA																
施肥水平 Nitrogen fertilization rate(NR)	0.469 ***				0.878 ***				0.242 *				0.385 **			
干湿交替次数 Number of drying-wetting cycles (NDW)	0.232 *				0.955 ***				0.975 ***				0.677 ***			
施氮水平 × 干湿交替次数 NR × NDW	0.223				0.620 ***				0.255				0.117			

注: DW0、DW3、DW6、DW10 分别表示持续湿润、3 次干湿交替、6 次干湿交替、10 次干湿交替。同行不同字母表示在 5% 水平上的差异显著性, \*、\*\*、\*\*\* 分别表示 5%、1%、0.1% 水平上的显著性作用

Note: DW0, DW3, DW6 and DW10 denotes 0, 3, 6 and 10 drying-wetting cycles, respectively. The different letters in the same row indicate significant differences at  $p < 0.05$  based on Duncan's test, and \*, \*\*, \*\*\* for two-way ANOVA represents significant effect of  $p < 0.05$ , 0.01, 0.001, respectively

### 3 讨 论

#### 3.1 不同施氮水平管理对土壤肥力的影响

尽管土壤对 pH 有一定缓冲能力,但是长期施入氮肥会引起土壤 pH 降低,这可能与铵态氮被硝化时产生质子有关,本研究结果与前人的研究<sup>[21]</sup>相一致。六年的施氮(N1~N4)管理提升了表层 0~20 cm 土壤的全氮和碱解氮,增加了表层土壤氮素的储备。土壤速效钾在不同施氮水平之间无明显变化规律可能是因为该地区土壤是富钾型土壤<sup>[9]</sup>,相同的磷肥施用量证实了全磷在不同施氮水平之间无明显差异。施氮促进作物生长,作物从土壤中汲取了更多的速效磷,六年的施氮管理明显降低了土壤速效磷。试验地每季作物的地上部分被移除了,地下部分生物量成为土壤碳积累的唯一来源,施氮提升了土壤有机碳可能是通过增加作物地下部分生物量来实现的。Liebig 等<sup>[21]</sup>和 Jagadamma 等<sup>[22]</sup>的研究表明施氮的确提升了土壤有机碳,而 Khan 等<sup>[23]</sup>的研究显示施氮结合秸秆移除会加剧土壤碳的损耗。某些生态系统中施氮能改善土壤碳

的贮存<sup>[24]</sup>,而在有些生态系统中施氮会加剧土壤碳的损耗<sup>[23]</sup>。

#### 3.2 干湿交替对土壤生化性质的影响

干湿交替刺激土壤提升其硝化势<sup>[1]</sup>,硝态氮和无机氮随之增加,本研究结果也与前人的研究<sup>[25]</sup>相一致。与持续湿润(DW0)相比,土壤经干湿交替后其溶解性有机碳有所增加,原因在于:(1)风干土迅速调湿,有些微生物分泌出渗透调节物质,有些细胞会破裂并释放出细胞质溶液<sup>[3]</sup>;(2)含水量瞬间增加使得团聚体破碎,团聚体包裹的有机物质进入土壤溶液,有些吸附于土壤颗粒表面的有机物质也会解吸进入土壤溶液<sup>[26]</sup>。

随着干湿交替次数增加,逐渐增加的溶解性有机碳和无机氮为微生物生长繁殖提供了碳源和氮源,微生物生物量碳相应地增加,脱氢酶(一种细胞内酶<sup>[11]</sup>)活性也相应地升高。Fierer 和 Schimel<sup>[1]</sup>的研究表明:干湿交替提高了有机质的有效性并能抵制微生物进入半休眠状态,以此增加微生物生物量碳。风干土迅速调湿后土壤基本呼吸增加,诸多文献<sup>[8,27]</sup>报道过这种 Birch 效应现象。随着干湿交替次数增加,土壤基本呼吸逐渐降低,原因在于:(1)

随着干湿交替次数增加,土壤溶液中有机的有效性降低,微生物矿化的有机质相应地降低,导致土壤基本呼吸逐渐降低;(2)频繁干湿交替迫使微生物活力降低以适应水势的不断变化,土壤基本呼吸相应降低<sup>[28]</sup>。Zhao 等<sup>[9]</sup>研究表明:频繁干湿交替后,幸存的微生物会同化吸收死亡微生物的生物量碳而迅速增殖,随之微生物矿化的有机碳比例下降,土壤基本呼吸降低。

土壤经干湿交替后,其溶解性有机碳可能解释

其他生化性质随干湿交替发生的变化。Smolander 和 Kitunen<sup>[29]</sup>的研究显示微生物生物量和活性与溶解性有机碳之间均有很好的相关性。碳源是微生物生长繁殖的限制因素<sup>[30]</sup>,大量的溶解性有机碳提升了微生物生物量和活性,影响微生物的群落结构<sup>[31]</sup>,随之土壤结构得到改善,碳氮有效性进一步提高<sup>[32]</sup>。本研究表明溶解性有机碳与无机氮、脲酶活性、脱氢酶活性及微生物生物量碳之间均有很好的相关性(图2)。

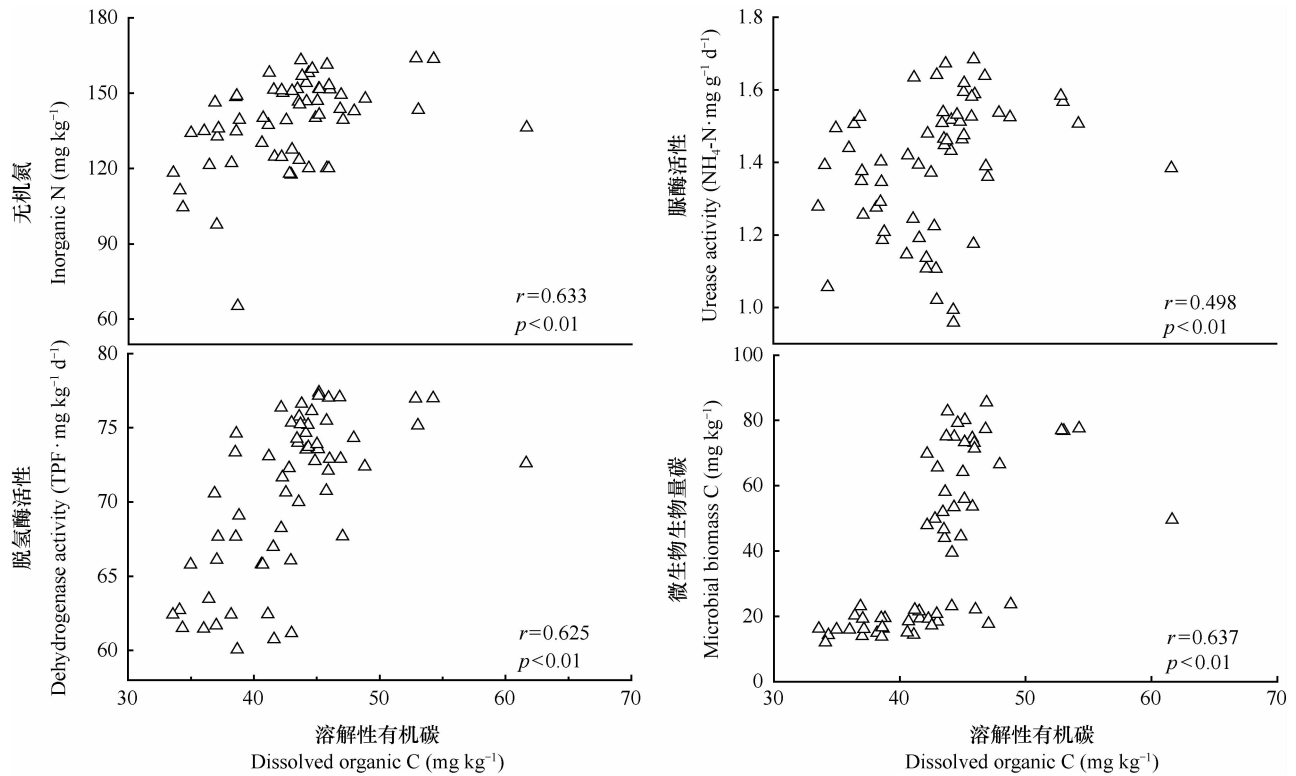


图2 土壤溶解性有机碳与无机氮、脱氢酶活性、脲酶活性、微生物生物量碳之间的相关性

Fig. 2 Pearson correlation of soil dissolved organic C with inorganic N, dehydrogenase activity, urease activity and microbial biomass C, respectively ( $r$  stands for correlation coefficient and  $p$  for significant level)

### 3.3 不同施氮水平的土壤随干湿交替的变异

不同施氮水平下土壤性质随干湿交替的变异系数反映了土壤随干湿交替的变异情况。与低施氮水平(N0、N1、N2)的土壤相比,高施氮水平下(N3、N4)土壤性质的变异系数更小(表5),进一步对土壤性质的变异系数作聚类分析,结果表明N3和N4处理能很好地发生聚类(图3)。本研究表明:当土壤遭遇干湿交替后,高施氮水平(施氮超过 $190 \text{ kg hm}^{-2}$ )的土壤更能维持其生化稳定性。

与低施氮水平(N0、N1、N2)的土壤相比,高施氮水平下(N3、N4)土壤有机质含量更高(表2),有

机质含量高的土壤能抵制频繁干湿交替的影响并维持其性质的稳定<sup>[9]</sup>。Xiang 等<sup>[3]</sup>的研究表明:含 $12.0 \text{ g kg}^{-1}$ 有机质的次表层土壤在遭遇频繁干湿交替后某些生物性质增加了8倍,而含 $22.0 \text{ g kg}^{-1}$ 有机质的表层土几乎无变化。Gordon 等<sup>[33]</sup>的研究显示含 $51.0 \sim 55.0 \text{ g kg}^{-1}$ 有机质的改良草地土在经受干湿交替后其微生物生物量氮较含 $77.0 \sim 83.0 \text{ g kg}^{-1}$ 有机质的未改良草地土降低更多。

土壤有机质的疏水特性提高了土壤抵水能力<sup>[34]</sup>。有机质含量高的土壤在干早期,利用有机分子之间作用力维持团聚体稳定<sup>[35]</sup>,当遭遇干湿交替

后其团聚体不易发生解聚,从而保持土壤结构和性质的稳定。有机质含量高的土壤有丰富的微生物

群落,多样性丰富的微生物群落更能抵制干湿交替的影响<sup>[36]</sup>。

表 5 不同施氮水平下土壤性质随干湿交替的变异系数

Table 5 Variation coefficients (%) of soil properties in soils subjected to drying-wetting alternation as affected by nitrogen fertilization rate

变异系数 Variation coefficient (%)							
铵态氮 Ammonium N	硝态氮 Nitrate N	无机氮 Inorganic N	溶解性有机碳 Dissolved organic C	脲酶活性 Urease activity	脱氢酶活性 Dehydrogenase activity	微生物生物量碳 Microbial biomass C	土壤基本呼吸 Basal soil respiration
17.6	14.6	14.4	8.7	5.6	8.2	70.7	17.5
25.8	10.1	10.0	15.1	5.1	7.8	73.0	14.3
23.1	5.9	5.9	9.2	7.3	8.9	68.4	10.5
22.2	6.9	6.6	8.5	4.6	6.1	66.7	8.6
20.9	7.0	6.8	8.2	4.2	5.6	68.8	10.1

重新调整距离聚类合并 Merging cluster based on rescaled distance

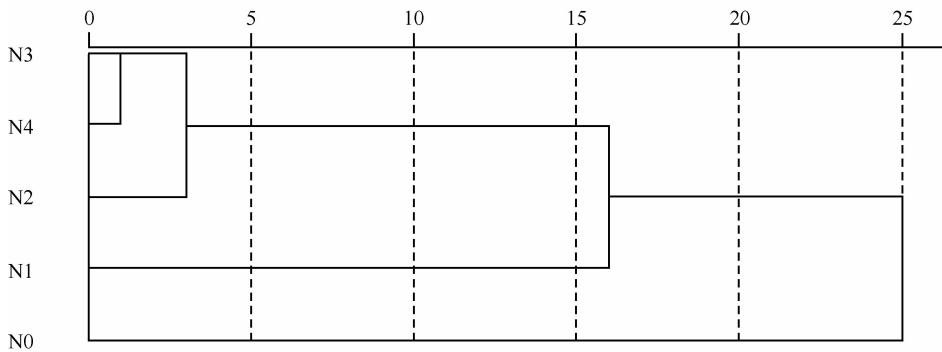


图 3 土壤性质变异系数的聚类分析图(x轴表示欧几里得平方距离)

Fig. 3 Dendrogram using average linkage (between groups) based on variation coefficients of soil properties (The x-axis represents the Square Euclidean distance)

## 4 结 论

综上所述,六年的施氮管理对表层 0~20 cm 土壤产生了一定影响。施氮降低了土壤 pH、速效磷、全钾,增加了全氮、碱解氮、有机碳,除有机碳随施氮水平的增加而增加外,其他肥力参数并未随施氮水平的增加而发生规律性变化。土壤经过不同次数干湿交替后,其生化性质发生了明显变化。土壤硝态氮、无机氮、溶解性有机碳、脲酶活性、脱氢酶活性和微生物生物量碳均随干湿交替次数增加而增加,土壤基本呼吸随干湿交替次数增加而降低。干湿交替后土壤溶解性有机碳的变化可能引起其他生化性质发生相应地改变。高施氮水平下土壤有机碳含量更高,使得土壤能更好地维持其生化性质的稳定。本研究对象仅是封丘地区的表层土壤,而黄淮海平原其他地区不同剖面土壤对干湿交替

的响应机制还有待进一步研究。

## 参 考 文 献

- [1] Fierer N, Schimel J P. Effects of drying-rewetting frequency on soil carbon and nitrogen transformations. *Soil Biol Biochem*, 2002, 34(6): 777—787
- [2] Butterly C R, Bunemann E K, McNeill A M, et al. Carbon pulses but not phosphorus pulses are related to decreases in microbial biomass during repeated drying and rewetting of soils. *Soil Biol Biochem*, 2009, 41(7): 1406—1416
- [3] 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. *Soil Biol Biochem*, 2008, 40(9): 2281—2289
- [4] 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 Sci Soc Am J*, 2003, 67(3): 798—805
- [5] Halverson L J, Jones T M, Firestone M K. Release of intracellu-

- lar solutes by four soil bacteria exposed to dilution stress. *Soil Sci Soc Am J*, 2000, 64(5): 1630—1637
- [ 6 ] Yao S H, 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. *Soil Biol Biochem*, 2011, 43(3): 590—599
- [ 7 ] Fierer N, Schimel J P, Holden P A. Influence of drying-rewetting frequency on soil bacterial community structure. *Microb Ecol*, 2003, 45(1): 63—71
- [ 8 ] Schimel J, Balsler T C, Wallenstein M. Microbial stress-response physiology and its implications for ecosystem function. *Ecology*, 2007, 88(6): 1386—1394
- [ 9 ] Zhao B Z, Chen J, Zhang J B, et al. Soil microbial biomass and activity response to repeated drying-rewetting cycles along a soil fertility gradient modified by long-term fertilization management practices. *Geoderma*, 2010, 160(2): 218—224
- [ 10 ] Aon M A, Cabello M N, Sarena D E, et al. I. Spatio-temporal patterns of soil microbial and enzymatic activities in an agricultural soil. *Appl Soil Ecol*, 2001, 18(3): 239—254
- [ 11 ] Dick R P. A review: Long-term effects of agricultural systems on soil biochemical and microbial parameters. *Agric Ecosyst Environ*, 1992, 40(1/4): 25—36
- [ 12 ] Aon M A, Colaneri A C. II. Temporal and spatial evolution of enzymatic activities and physico-chemical properties in an agricultural soil. *Appl Soil Ecol*, 2001, 18(3): 255—270
- [ 13 ] 熊毅. 黄淮海平原的生态系统. *土壤*, 1979, 11(2): 41—44. Xiong Y. The ecosystem of Huang-Huai-Hai Plain (In Chinese). *Soils*, 1979, 11(2): 41—44
- [ 14 ] 朱兆良. 中国土壤氮素研究. *土壤学报*, 2008, 45(5): 778—783. Zhu Z L. Research on soil nitrogen in China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 778—783
- [ 15 ] 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. Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [ 16 ] Zantua M I, Bremner J M. Comparison of methods of assaying urease activity in soils. *Soil Biol Biochem*, 1975, 7(4/5): 291—295
- [ 17 ] Chu H Y, Lin X G, Takeshi F, et al. Soil microbial biomass, dehydrogenase activity, bacterial community structure in response to long-term fertilizer management. *Soil Biol Biochem*, 2007, 39(11): 2971—2976
- [ 18 ] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass-C. *Soil Biol Biochem*, 1987, 19(6): 703—707
- [ 19 ] Joergensen R G. The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: Calibration of the k(EC) value. *Soil Biol Biochem*, 1996, 28(1): 25—31
- [ 20 ] Zornoza R, Guerrero C, Mataix-Solera J, et al. Assessing the effects of air-drying and rewetting pre-treatment on soil microbial biomass, basal respiration, metabolic quotient and soluble carbon under Mediterranean conditions. *Eur J Soil Biol*, 2007, 43(2): 120—129
- [ 21 ] Liebig M A, Varvel G E, Doran J W, et al. Crop sequence and nitrogen fertilization effects on soil properties in the Western Corn Belt. *Soil Sci Soc Am J*, 2002, 66(2): 596—601
- [ 22 ] Jagadamma S, Lal R, Hoefl R G, et al. Nitrogen fertilization and cropping systems effects on soil organic carbon and total nitrogen pools under chisel-plow tillage in Illinois. *Soil Tillage Res*, 2007, 95(1/2): 348—356
- [ 23 ] Khan S A, Mulvaney R L, Ellsworth T R, et al. The myth of nitrogen fertilization for soil carbon sequestration. *J Environ Qual*, 2007, 36(6): 1821—1832
- [ 24 ] Pregitzer K S, Burton A J, Zak D R, et al. Simulated chronic nitrogen deposition increases carbon storage in Northern Temperate forests. *Glob Change Biol*, 2008, 14(1): 142—153
- [ 25 ] Appel T. Non-biomass soil organic N—the substrate for N mineralization flushes following soil drying-rewetting and for organic N rendered CaCl<sub>2</sub>-extractable upon soil drying. *Soil Biol Biochem*, 1998, 30(10/11): 1445—1456
- [ 26 ] Muhr J, Franke J, Borken W. Drying-rewetting events reduce C and N losses from a Norway spruce forest floor. *Soil Biol Biochem*, 2010, 42(8): 1303—1312
- [ 27 ] McCulley R L, Boutton T W, Archer S R. Soil respiration in a subtropical savanna parkland: Response to water additions. *Soil Sci Soc Am J*, 2007, 71(3): 820—828
- [ 28 ] Lundquist E, Scow K, Jackson L, et al. Rapid response of soil microbial communities from conventional, low input, and organic farming systems to a wet/dry cycle. *Soil Biol Biochem*, 1999, 31(12): 1661—1675
- [ 29 ] Smolander A, Kitunen V. Soil microbial activities and characteristics of dissolved organic C and N in relation to tree species. *Soil Biol Biochem*, 2002, 34(5): 651—660
- [ 30 ] Alden L, Demoling F, Baath E. Rapid method of determining factors limiting bacterial growth in soil. *Appl Environ Microbiol*, 2001, 67(4): 1830—1838
- [ 31 ] Jokinen H K, Kiikkilä O, Fritze H. Exploring the mechanisms behind elevated microbial activity after wood ash application. *Soil Biol Biochem*, 2006, 38(8): 2285—2291
- [ 32 ] Stenberg M, Stenberg B, Rydberg T. Effects of reduced tillage and liming on microbial activity and soil properties in a weakly-structured soil. *Appl Soil Ecol*, 2000, 14(2): 135—145
- [ 33 ] Gordon H, Haygarth P M, Bardgett R D. Drying and rewetting effects on soil microbial community composition and nutrient leaching. *Soil Biol Biochem*, 2008, 40(2): 302—311
- [ 34 ] Caron J, Espindola C R, Angers D A. Soil structure stability during rapid wetting: Influence of land use on some aggregate properties. *Soil Sci Soc Am J*, 1996, 60(3): 901—908
- [ 35 ] Deneff K, Six J, Bossuyt H, et al. Influence of dry-wet cycles on the interrelationship between aggregate, particulate organic matter, and microbial community dynamics. *Soil Biol Biochem*, 2001, 33(12/13): 1599—1611
- [ 36 ] Steenwerth K L, Jackson L E, Calderon F J, et al. Response of microbial community composition and activity in agricultural and grassland soils after a simulated rainfall. *Soil Biol Biochem*, 2005, 37(12): 2249—2262



## SOIL FERTILITY AND ITS RESPONSE TO DRYING-WETTING ALTERNATION AS AFFECTED BY NITROGEN FERTILIZATION RATE

Chen Lin<sup>1,2</sup> Zhang Jiabao<sup>1†</sup> Zhao Bingzi<sup>1</sup> Huang Ping<sup>3</sup>

(1 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 401122, China)

**Abstract** In the field of a long-term experiment on integrated water and nitrogen management in the Fengqiu National Agro-ecological Experiment Station, soils samples were collected from plots subjected to different nitrogen fertilization rates (NR), i. e. 0, 150, 190, 230 and 270 kg hm<sup>-2</sup> per season, separately for analysis of parameters of soil fertility (i. e. soil pH, total N, total P, total K, available N, available P, available K and organic C). Results show that nitrogen fertilization decreased soil pH, available P and total K, but increased total N, available N and organic C to a varying degree. Apart from organic C which gradually increased with the increase in NR, no other parameters demonstrated any regular changes with increasing NR. After being subjected to 0, 3, 6 and 10 cycles of drying-wetting alternation and 60 days of incubation, soil samples were analyzed for chemical and biological properties (i. e. ammonium N, nitrate N, dissolved organic C, urease activity, dehydrogenase activity, microbial biomass C and basal soil respiration). Two-way ANOVA demonstrates that the number of drying-wetting cycles (NDW) considerably ( $p < 0.001$ ) affected ammonium N, nitrate N, inorganic N, dissolved organic carbon, dehydrogenase activity, microbial biomass C and basal soil respiration, and that NR and NDW had no significant interactive effects on soil properties, except for dehydrogenase activity. Irrespective of NR, nitrate N, inorganic N, dissolved organic C, urease activity, dehydrogenase activity and microbial biomass C increased with NDW, while BSR responded reversely. Soil properties variation coefficients in soils under high-rated nitrogen fertilization ( $> 190$  kg hm<sup>-2</sup>) were lower, and easier to get cluster. The above findings demonstrate that in soils subjected to drying-wetting alternation, high-rated nitrogen fertilization may help maintain their biochemical stability.

**Key words** Nitrogen fertilization rate; Soil fertility; Drying-wetting alternation; Biochemical properties

(责任编辑:檀满枝)