

# 不同植稻年限土壤剖面基本性质与水-氮分布的关系<sup>①</sup>

张君<sup>1,2</sup>, 刘目兴<sup>1,2</sup>, 易军<sup>1,2\*</sup>, 张海林<sup>1,2</sup>, 李胜龙<sup>1,2</sup>, 段赫<sup>1,2</sup>, 杨倩<sup>1,2</sup>

(1 地理过程分析与模拟湖北省重点实验室, 武汉 430079; 2 华中师范大学城市与环境科学学院, 武汉 430079)

**摘要:** 在江汉平原典型农业区选定不同水稻种植年限(2、18、>100 a)的稻田, 采用野外调查与室内分析相结合的方法, 量化不同稻田土壤剖面基本性质和水-氮分布特征, 以揭示内在原因, 探讨适宜不同水稻种植年限稻田的水-氮管理方式, 为提高稻田水-氮利用率和减少稻田面源污染提供科学依据。结果表明: 对于不同水稻种植年限农田, 土壤剖面基本性质差异明显。耕作层和犁底层厚度随水稻种植年限的延长而增加; 土壤有机质在耕作层富集, 且随水稻种植年限的延长含量增加; 耕作层土壤容重随水稻种植年限的延长而减小, 犁底层土壤容重则增大; 受耕作和淋溶条件的影响, 犁底层和心土层的黏粒含量随水稻种植年限的延长而增加; 饱和导水率( $K_s$ )随水稻种植年限的延长而降低, 犁底层  $K_s$  差异较大, 2、18、>100 a 稻田犁底层  $K_s$  分别为 37.02、8.45、3.11 cm/d。土壤剖面基本性质的差异影响水-氮的剖面分布特征。土壤水分和硝态氮含量随水稻种植年限的延长而增加, 2、18、>100 a 稻田土壤剖面(0~100 cm)平均含水量分别为 0.39、0.46、0.54  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ , 硝态氮含量分别为 3.75、6.27、9.85 mg/kg。铵态氮储量远低于硝态氮储量, 且受水稻种植年限影响较小; 2、18、>100 a 稻田土壤剖面铵态氮与硝态氮储量比值分别为 0.61、0.39 和 0.30。在灌溉和施肥方式上, 水稻种植年限短的稻田适合少量多次的管理方式以减少渗漏损失; 而年限长的稻田可适当提高单次灌溉量以减少灌溉次数, 进而减少劳力消耗。

**关键词:** 水稻种植年限; 土壤基本性质; 饱和导水率; 水-氮分布; 江汉平原

**中图分类号:** S156.6 **文献标识码:** A

合理灌溉和氮肥施用是水稻高产的重要保证, 施入稻田中的氮素除部分被植物吸收外, 大部分以无机氮(硝态氮和铵态氮)形式保存在土体<sup>[1]</sup>。不合理的水-氮管理措施不仅导致水-氮利用率降低, 还极易引起地表水和浅层地下水污染<sup>[2]</sup>。稻田水肥管理措施的制定需要考虑水稻品种、气候条件、地下水位和土壤性质(土壤质地、肥力、保水能力和渗透性)等, 而土壤属性是最为重要的影响因子<sup>[3-4]</sup>。在气候和土壤母质相近的条件下, 水稻种植年限是影响稻田土壤性质的重要原因<sup>[5]</sup>。曹志洪<sup>[5]</sup>对不同时间序列(50~2 000 a)的水稻土进行了系统的研究, 发现水稻种植过程中的翻耕犁耙、泥浆化和干湿排灌等农事活动促进了旱地土壤向水稻土的发育和熟化。在这一过程的持续影响下, 造成土壤剖面分层明显且理化性质差异显著。杨燕等<sup>[6]</sup>与张君等<sup>[7]</sup>对比了水稻种植 18 a 和 >100 a 稻田的土壤水力学特性(渗透性与持水性)和水流特征, 发

现年限短的稻田更容易发生渗漏, 持水性更弱。土壤水分是土壤氮素再分布的驱动因素, 水力学特性的差异不仅影响土壤水分的保持和运动特性, 也会改变土壤剖面的氮素分布与淋失特征<sup>[8]</sup>。因此, 揭示不同水稻种植年限稻田土壤水-氮分布特征, 对水稻种植区水-氮利用率的提高具有重要意义。

我国农田种植方式主要有连续水稻种植、水旱轮作和旱作; 稻田在夏季进行水稻种植, 而旱作农田夏季主要种植玉米、大豆和棉花等作物。近年来, 由于受到水稻种植机械化水平的提高、务农劳动力的减少、灌溉条件的改善和水稻种植收益显著增加等因素的综合影响, 促使旱地向稻田转变(旱改水)的面积逐年增加<sup>[9]</sup>。水稻种植年限的差异不仅影响农田土壤剖面基本性质, 还会造成土壤剖面水-氮迁移和分布的差异。农民由于缺乏科学的灌溉和施氮指导依据, 往往不考虑水稻种植年限差异, 而对所有稻田采取相同

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601215, 41771261)、湖北省自然科学基金创新群体项目(2016CFA027)和华中师范大学中央高校基本科研业务费项目(CCNU16A05015, CCNU17TS0001)资助。

\* 通讯作者(yijun@mail.ccnu.edu.cn)

作者简介: 张君(1990—), 男, 湖北恩施人, 硕士研究生, 主要研究方向为农田土壤水文过程。E-mail: zhangjun@mails.ccnu.edu.cn

的灌溉和施氮措施,即完全一致的单次灌溉量和氮肥施用方案。这种不合理的农田管理方式不仅降低了水-氮利用率,还可能加剧水体被硝酸盐污染的风险<sup>[10]</sup>。因此,制定考虑水稻种植年限差异的稻田水-氮管理措施,对水稻种植区水-氮利用率的提高和减轻水稻种植造成的水体污染具有重要意义。

江汉平原是我国重要的商品粮基地和典型的水稻种植区,近 20 a 来,旱改水面积不断增加<sup>[9]</sup>,不合理的稻田灌溉和氮肥施用措施将显著增加水体硝酸盐污染的潜在风险。本研究以江汉平原地区不同水稻种植年限稻田为研究对象,量化不同年限稻田土壤剖面基本性质和水-氮分布特征,以揭示土壤性质差异对水-氮分布的影响机制,为考虑水稻种植年限差异的稻田水-氮管理措施的制定提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

江汉平原位于湖北省中南部,是长江中游平原的重要组成部分。气候类型为北亚热带季风气候,年均降雨量 1 100~1 400 mm,降雨主要集中在 4—9 月,年平均日照时数 1 850~2 100 h,无霜期 243~275 d,10 °C 积温为 5 100~5 300 °C,1 月平均气温为 6.7 °C,7 月均温在 28 °C 以上<sup>[11]</sup>。土壤母质以近现代河流冲积物和湖相沉积物为主,多年平均地下水位为 0.9~1.2 m<sup>[12]</sup>。农作物种植制度主要有单季中稻、水旱轮作、双季稻和旱作。

### 1.2 样地选取与土样采集

本研究样点位于华中师范大学江汉平原农业监测站(29°58'26.44" N, 112°20'23.58" E),通过对当地农户的走访和调研,在研究区分别选定水稻种植 2、

18、>100 a 的稻田田块作为研究样地,面积分别为 1 155、766、989 m<sup>2</sup>。本区的农田类型主要为旱地和稻田,旱地为棉花-小麦/油菜轮作,稻田则分为水旱轮作(中稻-小麦/油菜)、单季中稻和双季稻(早稻-晚稻)。2 a 和 18 a 稻田在水稻种植前为棉花-小麦/油菜轮作,由旱地改为稻田后实行中稻-小麦轮作;>100 a 稻田原为双季稻种植,近几年改为中稻-小麦轮作。各农田样地相距 500 m 以内,土壤母质相同,土壤属性的差异主要由不同耕作历史所致。

样品采集工作于水稻收获后一周内进行(2016 年 10 月 4—10 日)。在各稻田样地中间区域挖取深度为 100 cm 的土壤剖面,依据土壤形态特征进行发生层划分(耕作层、犁底层和心土层),然后在各发生层分别采集扰动土壤样品,用于土壤基本理化性质的测定。另外,为体现水力参数在剖面上的变化过程,分别在 0~8、8~20、20~30、30~45、45~52、52~60、60~70、70~80 cm 深度采集原状环刀土壤样品(5 个重复),用于测定土壤饱和导水率。除剖面样品采集外,另外在各稻田随机选取 9 个样点,用土钻以 10 cm 为间隔从地表开始采集扰动土壤样品,采样深度为 100 cm,共计 270 个样品,用于测定土壤含水量、硝态氮和铵态氮含量。

### 1.3 样品测定与数据处理

土壤基本理化性质和饱和导水率测定:土壤有机质用重铬酸钾氧化法测定,容重用环刀法测定,机械组成用马尔文激光粒度分析仪测定,饱和导水率用定水头法测定<sup>[13]</sup>。土壤基本理化性质见表 1。

土壤含水量、硝态氮和铵态氮测定:土壤含水量用烘干法测定;土壤样品在使用 2 mol/L 的 KCl 溶液浸提后,用紫外分光光度计法和靛酚蓝比色法分别测

表 1 不同水稻种植年限稻田土壤基本理化性质  
Table 1 Basic soil properties of paddy fields with different cultivation years

植稻年限(a)	深度(cm)	发生层	有机质(g/kg)	容重(g/cm <sup>3</sup> )	机械组成(%)		
					砂粒	粉粒	黏粒
>100	0~18	耕作层	33.3±0.92	0.98±0.10	36.40	33.18	30.42
	18~37	犁底层	11.61±0.83	1.54±0.03	23.11	36.96	39.93
	>37	心土层	8.99±0.61	1.38±0.04	16.08	39.81	44.11
18	0~16	耕作层	28.76±1.08	1.09±0.07	35.93	35.02	29.05
	16~28	犁底层	8.12±0.67	1.46±0.05	28.14	39.07	32.79
	>28	心土层	9.45±0.64	1.37±0.04	23.70	40.97	35.32
2	0~10	耕作层	13.85±0.31	1.18±0.02	29.57	41.02	29.40
	10~20	犁底层	11.15±0.48	1.37±0.06	39.08	39.02	21.90
	>20	心土层	7.92±0.36	1.31±0.04	39.43	34.72	25.85

定硝态氮和铵态氮含量<sup>[13]</sup>。

数据计算与处理：本文依据以下公式进行 0 ~ 100 cm 土壤剖面的储水量、硝态氮和铵态氮积累量计算。土壤体积含水量( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )=质量含水量(%)/土壤容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ )；土壤储水量( $\text{mm}$ )=土层厚度( $\text{cm}$ ) $\times$ 土壤容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) $\times$ 土壤质量含水量( $\%$ ) $\times 10$ ；土壤硝态氮积累量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )=土层厚度( $\text{cm}$ ) $\times$ 土壤容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) $\times$ 硝态氮含量( $\text{mg}/\text{kg}$ )/10；土壤铵态氮积累量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )=土层厚度( $\text{cm}$ ) $\times$ 土壤容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) $\times$ 铵态氮含量( $\text{mg}/\text{kg}$ )/10。

本文分别使用 Origin 9.0 和 SPSS 19.0 进行制图和方差分析。

### 2 结果

#### 2.1 稻田土壤剖面基本性质

不同水稻种植年限土壤剖面分层差异明显(表 1)。耕作层和犁底层厚度均随水稻种植年限的延长而增加。对于耕作层,水稻种植>100 a 稻田土壤容重最小,18 a 次之,2 a 最大;对于犁底层,水稻种植 2 a 土壤容重最小,18 a 次之,>100 a 最大。犁底层和心土层的黏粒含量随着水稻种植年限的延长而增加,耕作层受种植年限影响较小,各农田之间差异较小。各稻田土壤有机质在耕作层富集,且随水稻种植年限延长而增加,水稻种植>100 a 和 18 a 稻田分别是 2 a 稻田的 2.40 倍和 2.08 倍。

饱和导水率( $K_s$ )能较好反映土壤渗透性能, $K_s$ 越高,水分越容易发生渗漏。耕作层  $K_s$  最大,水稻种植 2、18、>100 a 土壤耕作层  $K_s$  分别为 77.1、64.95、49.37  $\text{cm}/\text{d}$ (图 1)。犁底层  $K_s$  显著低于耕作层,2 a 样地犁底层平均  $K_s$ (37.02  $\text{cm}/\text{d}$ )最大,分别是 18 a 和 >100 a 样地的 4.38 倍和 11.88 倍。18 a 和 >100 a 稻田

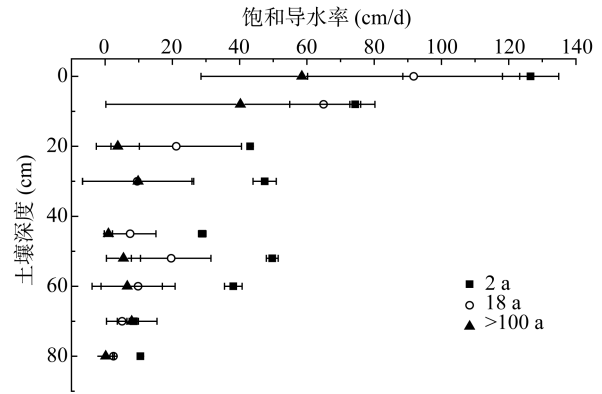


图 1 不同水稻种植年限稻田  $K_s$   
Fig. 1  $K_s$  in paddy fields with different cultivation years

心土层土壤  $K_s$  维持在较低水平,分别为 9.01  $\text{cm}/\text{d}$  和 4.23  $\text{cm}/\text{d}$ ,远低于 2 a 稻田土壤(27.14  $\text{cm}/\text{d}$ )。

#### 2.2 稻田土壤剖面含水量

不同水稻种植年限条件下,土壤渗透性能和水分保持能力存在差异,进而导致剖面土壤水分含量有较大区别(图 2)。随着水稻种植年限的延长,土壤剖面含水量越高;水稻种植 2、18、>100 a 稻田 0 ~ 100 cm 剖面土壤平均含水量分别为 0.39、0.46、0.54  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 。随土壤深度增加,各稻田土壤含水量表现出不同的垂直分布特征。2 a 稻田土壤表层含水量最低,随深度增加含水量持续上升,变化范围介于 0.36 ~ 0.44  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 。水稻种植 18 a 和 >100 a 稻田土壤含水量随深度增加表现出先下降后上升的趋势,18 a 稻田在 10 ~ 20 cm 深度土壤含水量最低,>100 a 稻田土壤含水量最低值在 20 ~ 30 cm 深度。随着深度的进一步增加,>100 a 稻田土壤含水量持续上升并趋于稳定,变化范围介于 0.47 ~ 0.59  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;18 a 稻田土壤含水量在 20 ~ 50 cm 深度持续上升,50 ~ 100 cm 深度含水量有明显波动,变化范围介于 0.43 ~ 0.52  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 。

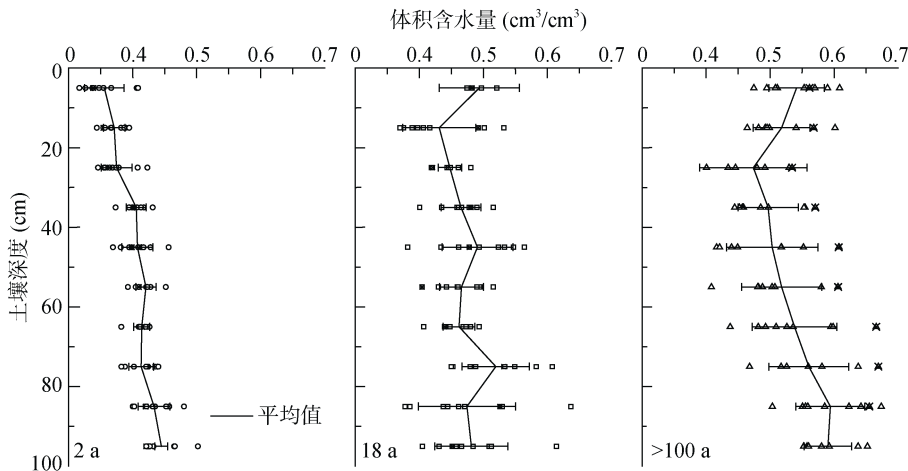


图 2 不同水稻种植年限稻田土壤剖面体积含水量

Fig. 2 Profile distribution of soil water contents in paddy fields with different cultivation years

### 2.3 稻田土壤剖面硝态氮和铵态氮分布

各稻田土壤剖面硝态氮含量随深度增加而降低(图 3), 0~20 cm 土层硝态氮含量最高, 20~100 cm 土层硝态氮含量较低且各土层间差异较小。水稻种植 2、18、>100 a 农田 0~20 cm 土层硝态氮平均含量分别为 7.85、10.58、19.69 mg/kg, 20~100 cm 土层分别为 2.72、5.19、7.39 mg/kg。不同水稻种植年限农田土壤硝态氮含量有明显差异, >100 a(9.85 mg/kg)稻田硝态氮含量最高, 18 a(6.27 mg/kg)其次, 2 a(3.75 mg/kg)最低。

稻田土壤铵态氮含量显著低于硝态氮, 土壤剖面铵态氮含量随深度增加而降低(图 4)。耕作层铵态氮含量明显高于其他土层, 水稻种植 2、18、>100 a 农田 0~20 cm 土层铵态氮含量分别为 4.40、3.72、3.47 mg/kg, 分别是 20~100 cm 土层的 1.78 倍、1.69 倍和 1.35 倍。0~20 cm 土层铵态氮含量随水稻种植年限的延长而减少; 20~100 cm 深度铵态氮含量受水稻种植年限的影响较小。各稻田土壤剖面铵态氮含量平均值差异较小, 2、18、>100 a 稻田分别为 2.62、2.50、2.75 mg/kg。

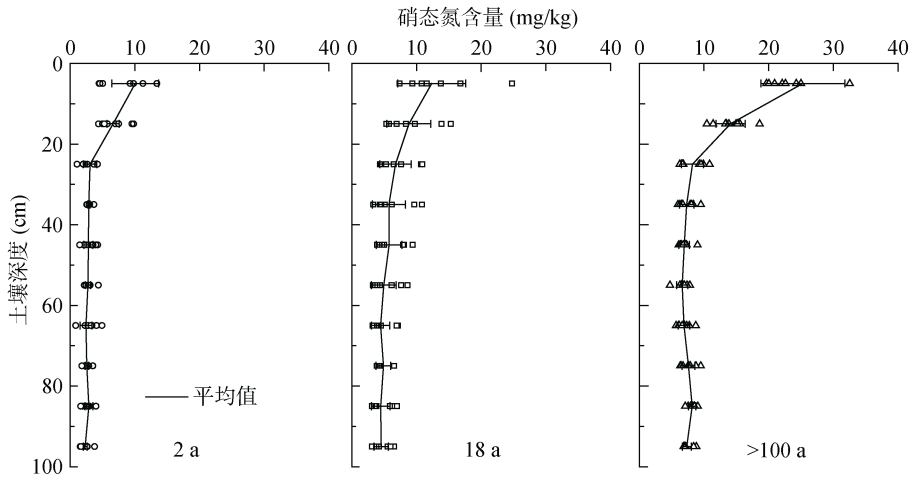


图 3 不同水稻种植年限稻田土壤剖面硝态氮分布

Fig. 3 Profile distribution of soil nitrate nitrogen in paddy fields with different cultivation years

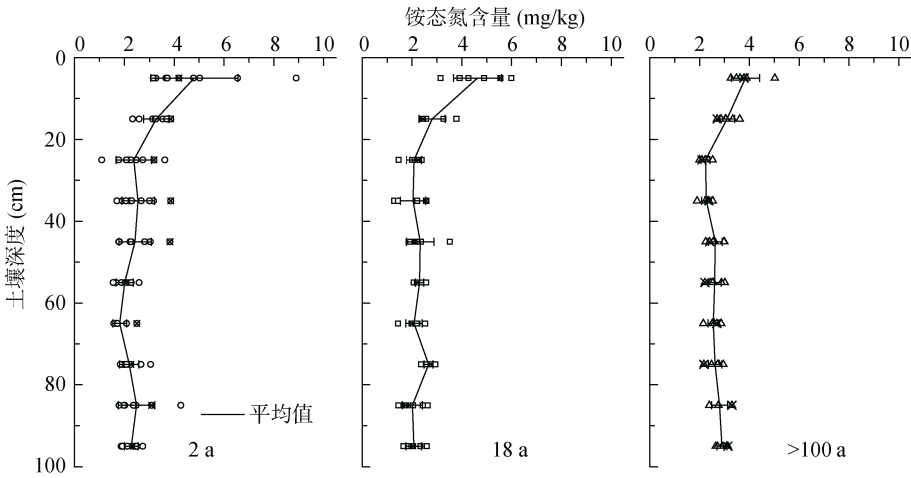


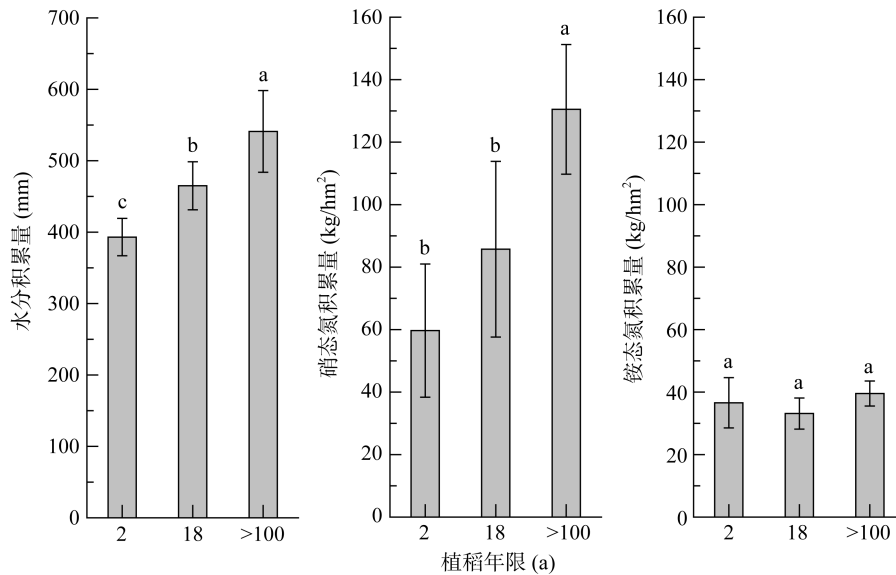
图 4 不同水稻种植年限稻田土壤剖面铵态氮分布

Fig. 4 Profile distribution of soil ammonia nitrogen in paddy fields with different cultivation years

### 2.4 土壤剖面储水量和硝态氮、铵态氮积累量

不同水稻种植年限农田 0~100 cm 土壤剖面水-氮积累量存在较大差异(图 5)。水稻种植>100 a 稻田储水量最高(541.08 mm), 分别是 18 a 和 2 a 稻田的 1.16 倍和 1.38 倍。3 种农田土壤剖面硝态氮积累量差异显著, 表现为随水稻种植年限的延长而增加。铵态

氮积累量远低于硝态氮, 3 种稻田土壤铵态氮积累量无显著差异。随着水稻种植年限的延长, 土壤剖面铵态氮储量与硝态氮储量比值逐渐降低, 2、18、>100 a 稻田其比值分别为 0.61、0.39 和 0.30。积累速率能较好地反映一段时期水-氮积累的状况, 2~18 a 和 18~100 a 时间段(>100 a 稻田种植年限按照 100 a 计算,



(图中不同小写字母表示不同水稻种植年限条件下稻田剖面水分、硝态氮和铵态氮之间的差异显著性( $P < 0.05$ ))

图 5 不同水稻种植年限稻田土壤剖面 0~100 cm 土层的水分、硝态氮和铵态氮积累量

Fig. 5 Soil water storages and accumulation of nitrate and ammonium nitrogen in 0 - 100 cm soil pedons in paddy fields with different cultivation years

下同)内土壤剖面水分和硝态氮积累速率均随水稻种植年限的延长而降低, 2~18 a 和 18~100 a 土壤水分积累速率分别为 4.50 mm/a 和 0.93 mm/a, 硝态氮积累速率分别为 1.63 kg/(hm<sup>2</sup>·a)和 0.55 kg/(hm<sup>2</sup>·a)。

### 3 讨论

#### 3.1 水稻种植年限差异对土壤性质的影响

长期的农耕措施会对土壤性质造成显著影响,特别是水稻种植中的水耕熟化作用<sup>[5,14]</sup>。稻田在播种或秧苗移栽前,一般需要进行翻耕、泡田和泥浆化等耕作活动,导致耕作层土壤容重显著降低;而耕作层以下土壤受耕作器具压实,会形成结构紧实的犁底层<sup>[15-16]</sup>。水稻种植年限会显著影响犁底层的厚度和发育程度, Walker 和 Rushton<sup>[17]</sup>认为犁底层需要经历 10~20 a 的机械压实,才能逐渐变厚;曹志洪<sup>[5]</sup>认为旱耕条件下犁底层发育程度要远低于稻田,因此 2 a 稻田犁底层厚度最小。

水耕年限差异不仅导致土壤分层明显,也会影响土壤理化性质。研究发现,犁底层土壤容重和耕作层有机质含量均随水稻种植年限的延长而增加<sup>[18]</sup>。由于稻田的机械化水平高于旱地,水稻种植年限越长,土壤受机械压实更为强烈,犁底层更紧实,土壤容重更大<sup>[16]</sup>。稻田的秸秆和根系残留输入量要高于旱地,特别是近年来水稻秸秆不再用作燃料或牲畜冬季饲料,大量水稻秸秆的输入加速了稻田有机质的积累;另外,水稻种植下的长期淹水厌氧环境,显著降低了

有机质的矿化速率,也有利于有机质的保存,进而导致水稻种植年限越长的稻田土壤有机质含量越高, Chen 等<sup>[19]</sup>的研究也有类似发现。但不同水稻种植年限土壤有机质积累速率存在差别,水稻种植 2~18 a 期间耕作层有机质的积累速率为 0.93 g/(kg·a),远高于 18~100 a 时段的 0.05 g/(kg·a),这可能是由于高有机质条件下,土壤有机碳循环已经处于平衡状态<sup>[5]</sup>。深层土壤受机械压实和秸秆输入影响较小,因此不同水稻种植年限稻田心土层的土壤容重和有机质含量差异较小。水稻种植年限的差异会显著影响剖面的黏粒分布,在水稻种植条件下,耕层土壤会被泥浆化,这有利于黏粒颗粒的形成<sup>[16]</sup>;而稻田的淹水条件会导致耕作层的黏粒被淋洗至深层土体,特别是通过土壤的大孔隙或裂隙等优先流通道,从而导致犁底层和心土层黏粒含量的增加<sup>[5,19]</sup>。尽管稻田耕作层在持续水耕后黏粒含量会增加,但由于黏粒的向下迁移和地表径流共同导致耕作层黏粒的损失,最终造成不同水稻种植年限农田耕作层黏粒含量差异较小<sup>[16]</sup>。

土壤性质差异会显著影响土壤的孔隙特征,进而影响土壤的渗透性能。耕作层土壤疏松多孔,渗透性能强;犁底层土壤容重大,渗透性能弱。随着水耕年限的延长,犁底层发育逐渐成熟,渗透性变弱。Liu 等<sup>[20]</sup>研究表明,在经历 14 次水稻种植后犁底层  $K_s$  才会明显降低。水稻种植前期的泥浆化、机械压实以及种植期间的淹水条件可以显著改变土壤性质,进而影响孔隙分布,最终造成土壤渗透性能差异<sup>[21-22]</sup>。相

相关性分析结果表明,土壤容重是影响稻田土壤  $K_s$  的主要因子( $R^2=0.62$ ,  $n=58$ ),容重越大, $K_s$  越低。土壤黏粒也会影响土壤  $K_s$ ,研究发现,土壤黏粒含量与  $K_s$  呈显著负相关关系( $R^2=0.49$ ,  $n=37$ ),土壤黏粒含量随水耕年限的延长而增大,相应的  $K_s$  更低。而土壤有机质含量与  $K_s$  呈显著正相关关系( $R^2=0.65$ ,  $n=36$ ),这是因为土壤有机质可以显著改善土壤孔隙结构<sup>[23]</sup>。

### 3.2 土壤性质对稻田水-氮分布的影响

不同水稻种植年限土壤基本性质的差异会显著影响土壤水分的渗漏与保持特征<sup>[7]</sup>,进而改变土壤剖面的水-氮分布。 $K_s$  越大,土壤水分越容易发生渗漏; $K_s$  越小,土壤水分更容易被保存。随着水耕年限的延长,机械压实和黏粒迁移现象更加明显,导致土壤渗漏性能降低而持水能力增加,两者共同导致土壤储水量的升高。另外,有机质含量的增加也有利于土壤水分的保持,这是由于土壤有机质的增加可以改善土壤的胶体状况,从而增加土壤对水分的吸附性能<sup>[23]</sup>。水分渗漏不仅降低了水分利用效率,渗漏的同时还会带着可溶性养分向下层土体迁移<sup>[24]</sup>,进而影响肥料利用效率。尿素施入稻田后会迅速发生转化,主要以铵态氮和硝态氮形式存在。由于铵态氮易被带负电荷的土壤颗粒吸附,因此不易淋洗,主要存在于土壤表层;而硝态氮易随水淋洗,因此导致剖面尺度硝态氮含量高于铵态氮<sup>[22]</sup>。对于水稻种植年限较短的新稻田,水分渗漏速率较高,因此农民会更频繁地进行施肥和灌溉,导致更多的硝态氮被淋洗出0~100 cm土层,因此2 a和18 a稻田剖面硝态氮含量显著低于>100 a稻田。此外,水稻种植年限较短的稻田土壤大孔隙更为丰富<sup>[6]</sup>,导致氮肥施用后氮素淋洗量进一步增加。随着水稻种植年限延长,稻田土壤剖面储水量和硝态氮积累量增加,由于早期的水耕作用对土壤性质影响速度较后期快<sup>[5]</sup>,也就导致2~18 a稻田比18~100 a稻田有更快的储水量和硝态氮积累速率;而本文在进行水-氮积累速率计算时将>100 a稻田当作100 a进行处理,因此18~100 a稻田的实际水-氮积累速率要更低。

由于不同水稻种植年限稻田的水-氮渗漏特征差异较大,因此农民在制定灌溉和施氮方案时必须考虑水稻种植年限的差异。对于水稻种植年限较短的新稻田,土壤渗透能力强而持水能力弱,氮素极易随着水流渗漏至深层土体或地下水,因此单次灌溉量或施氮量的增加并不会显著提高作物对水-氮的吸收<sup>[25]</sup>。为减少水-氮渗漏损失和保证作物生长,对于水稻种植年限短的稻田应适当降低单次灌溉量和施氮量,同时

增加施肥和灌溉次数。随着水稻种植年限的延长,土壤渗漏性能显著降低,而土壤保持水分和养分的能力增强,水-氮渗漏的风险显著减小,单次较高的灌溉量也不会导致水-氮的大量淋洗。因此,对于老稻田可以适当增加单次灌溉量或施肥量,以减少灌溉和施肥造成的劳动力投入,但也需要注意防止灌溉与强降雨事件的叠加造成地表径流引起水-氮流失<sup>[26]</sup>。另外,为减少稻田水-氮渗漏,针对水稻种植年限短的稻田,在水稻种植前的翻地期间可适当增加泥浆化次数以加速犁底层的形成。为进一步量化不同水稻种植年限稻田土壤水-氮流失过程,可通过水稻生育期的水-氮要素动态监测和数值模拟的方式实现。

## 4 结论

不同水稻种植年限土壤基本性质差异明显。耕作层与犁底层的厚度、耕作层有机质含量、犁底层容重、犁底层与心土层的黏粒含量均随水稻种植年限的延长而增加;而饱和导水率和耕作层土壤容重随水稻种植年限的延长而降低。

不同水稻种植年限土壤性质的差异影响了稻田土壤剖面水-氮分布。随着水稻种植年限的延长,剖面土壤水分和硝态氮含量显著升高,铵态氮含量变化较小。水稻种植早期的土壤剖面水分和硝态氮积累速率显著高于后期。水稻种植年限较短的稻田,土壤水-氮更易发生渗漏损失,适合采取少量多次的灌溉和施肥方式;而老稻田水-氮流失控制应以地表径流防控为主。

### 参考文献:

- [1] Cameron K C. Nitrogen losses from the soil/plant system: A review[J]. *Annals of Applied Biology*, 2013, 162(2): 145-173
- [2] Janssen M, Lennartz B. Water losses through paddy bunds: Methods, experimental data, and simulation studies[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 369(1/2): 142-153
- [3] 胡嗣佳, 邓欧平, 张世熔, 等. 四川盆地水稻土有机碳与全氮的时空变异及影响因素研究[J]. *土壤*, 2016, 48(2): 401-408
- [4] 曹小闯, 李晓艳, 朱练峰, 等. 水分管理调控水稻氮素利用研究进展[J]. *生态学报*, 2016, 36(13): 3882-3890
- [5] 曹志洪. 中国灌溉稻田起源与演变及相关古今水稻土的质量[M]. 北京: 科学出版社, 2016
- [6] 杨燕, 易军, 刘目兴, 等. 不同水耕年限稻田土壤水分运动特征研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(2): 257-263

- [7] 张君, 易军, 刘目兴, 等. 不同水耕年限稻田土壤水分渗漏与保持特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 90–95
- [8] Beaudoin N, Saad J K, Cvan L, et al. Nitrate leaching in intensive agriculture in Northern France: Effect of farming practices, soils and crop rotations[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2005, 111(1): 292–310
- [9] 闫加力, 李懋, 熊双莲, 等. 旱改水对水稻幼苗生长的影响及秸秆的改良作用[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(5): 554–562
- [10] Peng S Z, Yang S H, Xu J Z, et al. Nitrogen and phosphorus leaching losses from paddy fields with different water and nitrogen managements[J]. Paddy and Water Environment, 2011, 9(3): 333–342
- [11] 李仁东, 程学军, 隋晓丽. 江汉平原土地利用的时空变化及其驱动因素分析[J]. 地理研究, 2003, 22(4): 423–431
- [12] 陈芳, 张海涛, 王天巍, 等. 江汉平原典型土壤的系统分类及空间分布研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(4): 761–771
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- [14] Kögel I, Amelung W, Cao Z, et al. Biogeochemistry of paddy soils [J]. Geoderma, 2010, 157(1): 1–14
- [15] Kukul S S, Aggarwal G C. Percolation losses of water in relation to puddling intensity and depth in a sandy loam rice (*Oryza sativa*) field[J]. Agricultural Water Management, 2002, 57(1): 49–59
- [16] Janssen M, Lennartz B. Horizontal and vertical water and solute fluxes in paddy rice fields[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 94(1): 133–141
- [17] Walker S H, Rushton K R. Verification of lateral percolation losses from irrigated rice fields by a numerical model[J]. Journal of Hydrology, 1984, 71(3): 335–351
- [18] Mousavi S F, Yousefi S, Mostafazadeh B, et al. Effect of puddling intensity on physical properties of a silty clay soil under laboratory and field conditions[J]. Paddy and Water Environment, 2009, 7(1): 45–54.
- [19] Chen L M, Zhang G L, Effland W R. Soil characteristic response times and pedogenic thresholds during the 1000-year evolution of a paddy soil chronosequence[J]. Soil Science Society of America Journal, 2011, 75(5): 1807–1820
- [20] Liu C W, Yu W S, Chen W T, et al. Laboratory investigation of plough sole reformation in a simulated paddy field[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2005, 131(5): 466–473
- [21] 张中彬. 红壤性水稻土裂隙特征及其对优势流的影响[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013
- [22] 袁久芹, 梁音, 曹龙熹, 等. 红壤坡耕地不同植物篱配置模式减流减沙效益对比[J]. 土壤, 2015, 47(2): 400–407
- [23] 王辉, 杨小宝, 田大作, 等. 紫鹊界梯田区不同土地利用类型土壤入渗特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(5): 123–126
- [24] 曹志洪, 林先贵, 杨林章, 等. 论“稻田圈”在保护城乡生态环境中的功能. 稻田土壤氮素养分的累积/迁移及其生态环境意义[J]. 土壤学报, 2006, 43(2): 256–260
- [25] 易军. 黑河中游不同景观单元水分运动与景观间水量交换[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2015
- [26] 胡玉婷, 廖千家骅, 王书伟, 等. 中国稻田氮淋失相关因素分析及总氮淋失量估算[J]. 土壤, 2011, 43(1): 19–25

## Profile Characteristics of Soil Properties and Water/Nitrogen Distribution in Paddy Fields with Different Cultivation Years

ZHANG Jun<sup>1,2</sup>, LIU Muxing<sup>1,2</sup>, YI Jun<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Hailin<sup>1,2</sup>, LI Shenglong<sup>1,2</sup>,  
DUAN He<sup>1,2</sup>, YANG Qian<sup>1,2</sup>

(1 Key Laboratory for Geographical Process Analysis & Simulation, Wuhan 430079, China; 2 College of Urban and Environmental Sciences, Central China Normal University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** In order to improve the water/nitrogen utilization efficiency and reduce the agricultural non-point source pollution, field investigation and lab analysis have been conducted to quantify the characteristics of water/nitrogen distribution and to explore the optimal irrigation and fertilizer schedules in paddy fields with different cultivation years (2 a, 18 a and >100 a) in the Jiangnan Plain. The results showed that significant differences in soil properties were observed among the paddy fields. With the increase of paddy cultivation year, the thickness of plough layer and plow pan, bulk density of plow pan, and clay content of subsoil layer and plow pan were all increased, whereas bulk density of the plough layer was decreased. Significant differences in saturated hydraulic conductivity ( $K_s$ ) were observed in soil profiles between the paddy fields, especially for the plow pan. The highest average  $K_s$  of the plow pan was observed in the 2 a field (37.02 cm/d), followed by the 18 a field (8.45 cm/d) and the >100 a field (3.11 cm/d). The profile distribution of water/nitrogen were affected by soil properties significantly. With the increase of paddy cultivation year, water/nitrate nitrogen ( $\text{NO}_3^-$ -N) content increased gradually, the average soil water content was 0.39, 0.46 and 0.54  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ , while the average soil  $\text{NO}_3^-$ -N content was 3.75, 6.27 and 9.85 mg/kg for the 2 a, 18 a and >100 a paddy fields, respectively. However, little difference was observed in ammonium nitrogen ( $\text{NH}_4^+$ -N) in the paddy fields. The ratios of  $\text{NO}_3^-$ -N and  $\text{NH}_4^+$ -N in 2 a, 18 a and >100 a fields were 0.61, 0.39 and 0.30, respectively. In order to reduce water/nitrogen percolation for the short-year paddy field, the strategies of more times but less amount in irrigation and fertilization could be applied, but for the longer-year paddy field, fewer times but high amount in irrigation and fertilization could be applied to cut the labor costs.

**Key words:** Paddy cultivation year; Soil basic property; Saturated hydraulic conductivity; Water and nitrogen distribution; Jiangnan Plain