

水耕年限对麦季土壤水—氮动态与小麦产量的影响

段赫¹, 刘目兴^{1,2}, 张海林^{1,2}, 刘秀芸¹, 张君¹, 易军^{1,2}

(1.地理过程分析与模拟湖北省重点实验室, 武汉 430079; 2.华中师范大学可持续研究中心, 武汉 430079)

摘要:为揭示水耕年限对小麦生产的影响,在江汉平原选取了3种水耕年限(2年、18年、>100年)稻—麦轮作农田,采集了小麦各生育期的土壤样品与成熟期的小麦植株样品,测定了土壤水分、硝态氮含量、铵态氮含量和小麦产量等指标,分析了土壤剖面水—氮动态分布与积累特征,及其对小麦产量的影响程度与机制。结果表明:(1)随水耕年限延长,土壤水分和氮素含量显著增加。水耕2年、18年和100年农田的0—100 cm深度剖面平均体积含水量分别为0.36、0.39、0.42 cm³/cm³。硝态氮和铵态氮在0—20 cm土层富集,水耕2年、18年和100年农田0—20 cm土层硝态氮含量分别为12.26、12.74、14.88 mg/kg,铵态氮含量分别为6.01、8.33、11.69 mg/kg。(2)小麦产量随着水耕年限的增加而降低,水耕2年、18年和100年农田小麦产量分别为4 068、3 080、2 469 kg/hm²,主要表现为降低小麦的有效穗数和单株穗粒数。(3)长年耕作稻田形成的犁底层造成耕作层土壤水分滞留,进而导致小麦产量降低,而氮素含量差异未显著影响小麦产量,需要通过改善农田排水状况以降低长水耕年限农田的小麦渍害风险。

关键词: 土壤含水量; 硝态氮; 铵态氮; 小麦; 江汉平原

中图分类号: S152; S512.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)06-0259-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.06.036

Effects of Paddy Rice Cultivation History on Water and Nitrogen Dynamics During Wheat Growth Period and Wheat Yield

DUAN He¹, LIU Muxing^{1,2}, ZHANG Hailin^{1,2}, LIU Xiuyun¹, ZHANG Jun¹, YI Jun^{1,2}

(1.Key Laboratory for Geographical Process Analysis & Simulation, Hubei Province, Wuhan 430079;

2.College of Urban and Environmental Sciences, Central China Normal University, Wuhan 430079)

Abstract: In order to identify the effects of paddy rice cultivation history on wheat production, three rice-wheat rotation fields with different paddy rice cultivation years (2 years, 18 years, and >100 years) were selected for study in the Jianghan Plain. Soil samples and wheat plants were collected in different wheat growth periods to measure the moisture, nitrate nitrogen (NO₃⁻-N) and ammonium nitrogen (NH₄⁺-N) contents in soils, and even the wheat yield. The results showed as follow: (1) With the increase of paddy rice cultivation years, soil moisture, NO₃⁻-N and NH₄⁺-N contents increased significantly. The highest average soil water content was observed in the >100 years field (0.42 cm³/cm³), followed by the 18 years field (0.39 cm³/cm³) and the 2 years field (0.36 cm³/cm³). NO₃⁻-N and NH₄⁺-N were enriched in the 0—20 cm soil layer, and the average NO₃⁻-N content and NH₄⁺-N content in this soil layer was 12.26 and 6.01 mg/kg, 12.74 and 8.33 mg/kg, and 14.88 and 11.69 mg/kg for the 2 years, 18 years, and >100 years paddy fields, respectively. (2) The wheat yields decreased with the extending paddy rice cultivation years, which was 4 068, 3 080 and 2 469 kg/hm² for the 2 years, 18 years, and >100 years paddy rice fields, respectively, and were characterized by the decreasing of number of available tillers and ears per plant. (3) Water logging in the plough layer was the main reason for the reduced wheat yield, rather than the differences in nitrogen content. It is necessary to enhance soil water drainage rate to reduce the risk of water logging on wheat growth in the fields with long paddy rice cultivation years.

Keywords: soil moisture; nitrate nitrogen; ammonium nitrogen; wheat; Jianghan Plain

收稿日期: 2020-05-04

资助项目: 国家自然科学基金项目(41601215, 41771261); 湖北省自然科学基金项目(2019CFB766, 2016CFA027); 华中师范大学中央高校基本科研业务费项目(CCNU19TS005)

第一作者: 段赫(1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤水文研究。E-mail: duanheee@163.com

通信作者: 易军(1987—), 男, 博士, 讲师, 主要从事土壤水文研究。E-mail: yijun@mail.ccnu.edu.cn

稻麦轮作是长江中下游地区主要的种植方式之一^[1],与单季作物相比,该种植方式可以通过提高复种指数增加作物产量;与双季稻种植相比,它可以有效减少灌溉,降低水资源消耗^[2]。因此,提高小麦产量是增加该地区粮食产量的重要途径之一。除作物品种外,土壤水分和氮素含量是影响小麦产量的 2 个重要因子^[3-6]。土壤水分和氮素含量的变化受环境因子(施肥、灌溉、气象条件)和土壤性质的影响最为强烈。由于长江中下游地区的小麦较少进行灌溉,因此针对小麦产量的研究主要围绕不同的施肥条件开展^[7-9]。土壤性质,特别是土壤物理性质的差异会显著改变土壤的渗透性和持水性,进而影响土壤水分与氮素分布^[10-11],最终影响小麦生长发育、产量和品质^[12-13]。然而,针对同一地区不同土壤性质下小麦产量差异的相关研究较少。

对于地势较为平坦的地区,由于成土母质、气候、植被、地形等成土因素较为接近,耕作历史成为影响农田土壤性质的主要因素^[10]。由于水稻机械化水平和经济效益的提高,“旱改水”趋势不断增强^[14],水耕过程及年限对土壤性质的影响不可忽视。Janssen 等^[15]发现,稻田耕作过程中形成的犁底层可显著阻碍水分的垂直运动,且土壤渗透性随水耕年限的延长而降低;张君等^[16]和杨燕等^[17]研究发现,土壤的持水特性随水耕年限的延长而增强,而渗透性变弱。此外,张君等^[18]对比了作物休闲期不同水耕年限农田的水分和氮素储量特征发现,随着水耕年限的延长,剖面土壤水分和硝态氮含量显著升高。然而,目前暂无关于不同水耕年限农田麦季土壤水—氮动态与小麦产量的对比研究。

本研究以长江中游地区的江汉平原为研究区,通过选取不同水耕年限的稻麦轮作农田,探究小麦生育期土壤水—氮的分布与积累特征及小麦产量的差异,并揭示其影响机制,以期为提高水旱轮作区小麦产量提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

江汉平原位于中国湖北省中南部,两湖平原的北部,系长江和汉江泛滥淤积形成的冲积平原,总面积为 $3.76 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。该区地处暖温带季风区,雨热同季,年平均气温 16.1°C ,无霜期 $173 \sim 239 \text{ d}$ 。多年平均降水量为 $1\,100 \sim 1\,400 \text{ mm}$,其中年降水量的 $70\% \sim 85\%$ 集中在 4—9 月。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 1.0 m 左右。

1.2 试验样地

本研究样点位于华中师范大学江汉平原农业监测站($112^\circ 20' 23.58''\text{E}$, $29^\circ 58' 26.44''\text{N}$)。分别选定 2015 年和

1998 年旱改水农田,以及连续水耕 >100 年农田作为研究样地,进行 1 个小麦生育季的田间试验;样地面积分别为 $1\,155,766,989 \text{ m}^2$ 。试验时间为 2016 年 11 月至 2017 年 5 月,则这 3 块样地的水耕年限分别为 2 年、18 年和 >100 年(以下简称为 100 年)。

水耕 2 年和 18 年农田在改为稻田之前为旱地,夏秋季种植棉花、大豆等作物,冬季种植小麦。改为稻田后,夏季种植水稻,冬季种植小麦(稻麦轮作)。100 年稻田在 2010 年前为双季稻种植,之后改为稻麦轮作。各农田相距 500 m 以内,具有相同的土壤母质,土壤属性的差异主要由不同耕作历史造成。

各农田于 2016 年 10 月收割水稻,并将水稻秸秆粉碎还田。于 11 月上旬起垄后(垄高 15 cm 、垄宽 120 cm)在垄上播种冬小麦,收获时间为次年 5 月中旬。各农田采取相同的施肥和管理措施,冬小麦在播种前施入基肥(尿素、碳氨和磷肥),纯氮量为 106 kg/hm^2 。分别在三叶期(12 月下旬)和拔节期(2 月中旬)追施尿素,纯氮量分别为 $114,52 \text{ kg/hm}^2$ 。整个小麦生育期未进行人工灌溉,田埂的排水口长期打开,便于排水。

试验期间降雨量和潜在蒸发量(由 Penman 公式计算得出)动态见图 1,气象数据来自中国气象数据共享中心。

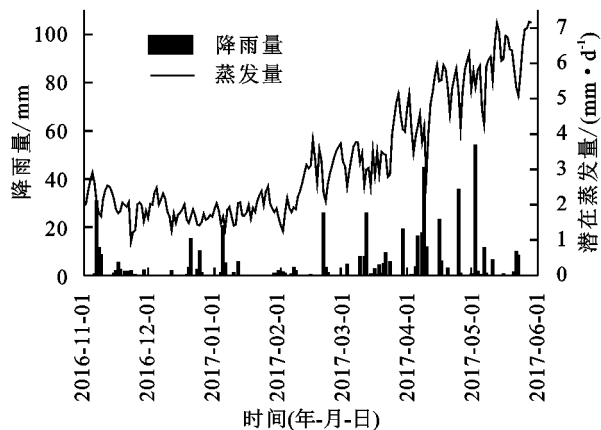


图 1 研究区降雨量及潜在蒸发量

1.3 样品采集与分析

1.3.1 样地土壤基础数据测定 于小麦播种前在各农田挖取深度为 100 cm 的土壤剖面,按 10 cm 间隔分层采集扰动和原状环刀土壤样品(5 个重复),用于土壤理化性质测定。具体包括土壤有机碳含量、饱和导水率(K_s)、水分特征曲线、容重和机械组成。有机碳含量用重铬酸钾氧化法测定, K_s 采用渗透率仪定水头法测定,水分特征曲线采用离心机测定(田间持水量为 0.33 hPa 吸力条件下的土壤含水量),容重采用环刀烘干法测定,机械组成采用马尔文激光粒度仪测定。根据性质差异,按照 $0 \sim 20, 20 \sim 40, 40 \sim 100 \text{ cm}$ 分层进行数据处理,土壤理化性质数据见表 1。

表 1 不同水耕年限农田土壤基本理化性质

农田 类型	土层 深度/cm	有机碳/ (g·kg ⁻¹)	K _s / (cm·d ⁻¹)	田间 持水量/%	容重/ (g·cm ⁻³)	机械组成/%		
						<0.002 mm	0.002~0.02 mm	>0.02 mm
2 年	0—20	12.48±0.90 ^{Aa}	29.91±1.97 ^{Aa}	34.77±1.08 ^{Ab}	1.40±0.02 ^{Aa}	29.32±0.25 ^{Aa}	41.02±0.25 ^{Aa}	29.57±0.62 ^{Aa}
	20—40	6.50±0.07 ^{Ba}	18.63±1.41 ^{ABa}	26.40±4.78 ^{Aa}	1.37±0.01 ^{Ab}	21.28±0.73 ^{Ab}	34.07±1.14 ^{Aa}	44.66±1.11 ^{Aa}
	40—100	4.66±0.07 ^{Bb}	10.27±0.41 ^{Ba}	29.73±9.90 ^{Aa}	1.33±0 ^{Aa}	29.10±0.73 ^{Ab}	36.81±1.55 ^{Aa}	34.08±3.83 ^{Aa}
18 年	0—20	13.98±1.11 ^{Aa}	23.73±2.86 ^{Aa}	40.39±3.42 ^{Aab}	1.19±0.03 ^{Bb}	31.23±0.55 ^{Aa}	36.66±0.39 ^{Bb}	32.11±0.93 ^{Aa}
	20—40	4.56±0.07 ^{Bb}	7.76±0.61 ^{Bb}	24.85±3.06 ^{Ca}	1.44±0.01 ^{Aab}	34.63±0.85 ^{Aa}	38.83±0.34 ^{Ba}	26.97±1.13 ^{ABb}
	40—100	5.30±0.07 ^{Bb}	11.03±0.56 ^{ABa}	29.24±3.37 ^{Ba}	1.32±0 ^{Aa}	34.11±0.43 ^{Ab}	41.64±0.19 ^{Aa}	24.25±0.37 ^{Bab}
100 年	0—20	16.61±1.13 ^{Aa}	14.25±2.36 ^{Aa}	46.57±12.95 ^{Aa}	0.99±0.03 ^{Cc}	30.42±0.87 ^{Ba}	33.18±0.14 ^{Bc}	36.40±0.34 ^{Aa}
	20—40	7.00±0.17 ^{Ba}	4.52±0.69 ^{Bb}	25.67±4.74 ^{Ba}	1.50±0 ^{Aa}	39.93±0.11 ^{Aa}	36.96±0.34 ^{Aa}	23.11±0.89 ^{Bb}
	40—100	6.18±0.15 ^{Ba}	7.60±0.31 ^{Ba}	29.26±4.47 ^{Ba}	1.28±0 ^{Bb}	44.11±2.35 ^{Aa}	39.81±0.43 ^{Aaa}	16.08±0.51 ^{Cb}

注:表中数据为平均值±标准差;不同大写字母表示同一水耕年限农田不同土层具有显著差异($P<0.05$);不同小写字母表示不同水耕年限农田同一土层具有显著差异($P<0.05$)。

1.3.2 小麦生育期土壤含水量、硝态氮和铵态氮含量测定 分别于小麦三叶期(2017 年 1 月 1 日)、拔节期(2 月 17 日)、抽穗期(3 月 16 日)、灌浆期(4 月 16 日)和收获期(5 月 15)于每块样地中心区随机采集 3 个位点的土壤样品。采样总深度为 100 cm,垂直间隔为 10 cm;3 个样地共采集 450 个土壤样品。采集的土壤用于测定含水量(烘干法)、硝态氮含量(紫外分光光度计法)和铵态氮含量(靛酚蓝比色法)。

1.3.3 小麦产量及其构成因素测定 小麦成熟后,于各农田随机割取 2 m²(3 个重复)范围小麦地上部分,数其总穗数,并脱粒、烘干测定籽粒产量和千粒重;穗粒数为 50 穗样本的平均籽粒数量。

1.4 数据计算与处理

土壤硝态氮积累量(kg/hm²)=土层厚度(cm)×土壤容重(g/cm³)×土壤硝态氮含量(mg/kg)/10

土壤铵态氮积累量(kg/hm²)=土层厚度(cm)×土壤容重(g/cm³)×土壤铵态氮含量(mg/kg)/10

表 2 不同生育期 0—100 cm 土层水分和氮素储量

水分和氮素储量	农田类型	三叶期	拔节期	抽穗期	灌浆期	收获期
水分积累/mm	2 年	475.34±21.59 ^{Ab}	427.55±14.18 ^{Ab}	344.21±16.57 ^{Ba}	333.48±10.39 ^{Ba}	368.46±52.79 ^{Ba}
	18 年	514.55±27.03 ^{Aab}	443.60±31.01 ^{Bb}	360.31±27.27 ^{Ca}	335.47±9.03 ^{Ca}	342.86±14.07 ^{Ca}
	100 年	551.86±35.74 ^{Aa}	501.70±29.85 ^{Aa}	369.82±31.57 ^{Ba}	350.95±33.03 ^{Ba}	375.42±33.91 ^{Ba}
铵态氮积累/ (kg·hm ⁻²)	2 年	50.27±18.73 ^{Aa}	32.45±6.54 ^{Aa}	41.39±7.30 ^{Aa}	45.02±7.00 ^{Aa}	38.84±7.56 ^{Aa}
	18 年	72.30±28.80 ^{Aa}	37.04±11.36 ^{Ba}	39.03±5.17 ^{Ba}	45.58±7.94 ^{ABa}	50.44±11.75 ^{ABa}
	100 年	92.93±23.58 ^{Aa}	48.76±9.73 ^{Ba}	47.58±5.51 ^{Ba}	52.28±6.58 ^{Ba}	61.37±17.22 ^{Ba}
硝态氮积累/ (kg·hm ⁻²)	2 年	115.52±66.62 ^{Aa}	48.86±7.81 ^{Ba}	65.96±29.99 ^{ABa}	44.64±13.05 ^{Ba}	53.71±7.72 ^{ABa}
	18 年	118.88±58.86 ^{Aa}	51.22±20.68 ^{Ba}	54.53±11.29 ^{Ba}	39.13±7.79 ^{Ba}	50.37±9.79 ^{Ba}
	100 年	107.82±49.49 ^{Aa}	50.88±14.82 ^{Ba}	56.10±12.24 ^{Ba}	54.46±17.69 ^{Ba}	62.07±12.34 ^{ABa}

注:表中数据为平均值±标准差;不同大写字母表示同一水耕年限农田不同生育期具有显著差异($P<0.05$);不同小写字母表示不同水耕年限农田同一生育期具有显著差异($P<0.05$)。

不同土层含水量随小麦生育期延伸的变化规律与储水量相似(图 2),从三叶期至抽穗期降幅较大,后期变化幅度较小。对于不同水耕年限农田,水分含量的差异主要体现在 0—20 cm 土层,而 20 cm 以下土层的水分含量差异较小。对于 0—20 cm 土层,土壤平均含水量表

土壤储水量(mm)=土层厚度(cm)×土壤容重(g/cm³)×质量含水量(%)×10

数据统计分析和图表制作分别采用 SPSS 22 和 Origin 9.0 软件。

2 结果与分析

2.1 土壤水分分布

整个生育期农田平均储水量随水耕年限的延长而增大,水耕 2 年、18 年和 100 年农田分别为 389.81, 399.40,429.95 mm。从三叶期至灌浆期,3 种农田的储水量均持续降低,其中从拔节期至抽穗期降幅最大,从灌浆期至收获期略有升高(表 2)。各农田土壤储水量的差异主要表现在三叶期和拔节期,尽管其他时期 100 年农田的储水量在数值上略大于 18 年和 2 年农田,但在统计学上无显著差异($P>0.05$)。在三叶期,100 年农田的储水量最高,18 年农田其次,2 年农田最低;在拔节期,100 年农田储水量高于 18 年和 2 年农田,而 18 年和 2 年农田无显著差异。

现为 100 年农田最高(0.44 cm³/cm³),18 年其次(0.38 cm³/cm³),2 年最低(0.28 cm³/cm³),分别为其对应田间持水量的 94.48%,94.08%,80.51%。

2.2 土壤铵态氮分布

整个生育期农田剖面铵态氮平均积累量随水耕年

限的延长而增大,水耕 2 年、18 年和 100 年农田分别为 41.60,48.88,60.59 kg/hm²。铵态氮积累量在小麦三叶期最高,收获期其次,其他时期较低(表 2)。不同水耕年限农田铵态氮积累量的差异主要出现在三叶期和收获

期,而其他时期无显著差异。在三叶期,100 年农田最高(92.93 kg/hm²),分别是 2 年和 18 年农田的 1.85, 1.29 倍。在收获期,100 年农田显著高于 2 年农田, 18 年农田与 100 年和 2 年农田均无显著差异。

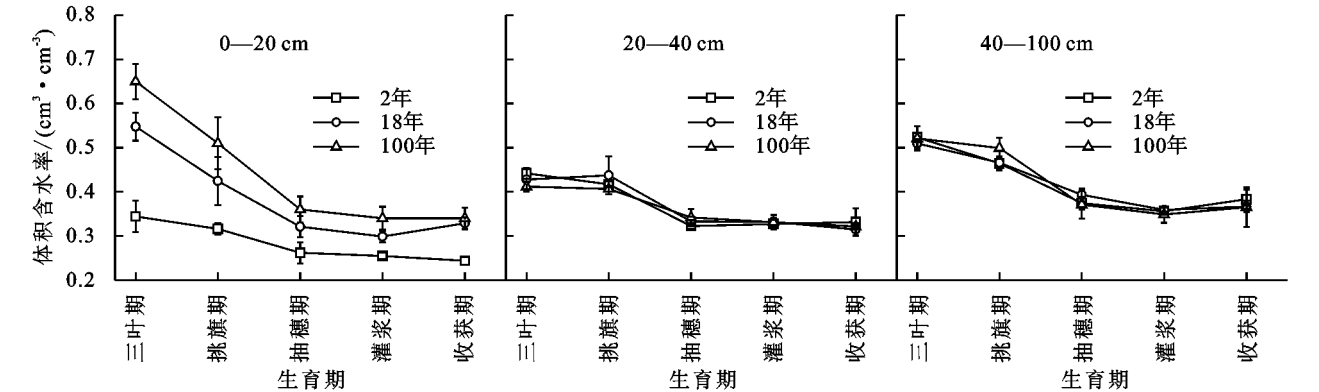


图 2 不同生育期土壤剖面含水量分布

各农田土壤铵态氮主要分布在 0—20 cm 土层(图 3),2 年、18 年和 100 年农田中该土层铵态氮平均含量分别为 6.01,8.33,11.69 mg/kg。随着土层深度的增加,铵态氮浓度迅速下降,20—100 cm 土层分别为 2.57,2.79, 3.12 mg/kg。铵态氮浓度随时间变化主要发生在 0—20 cm 土层,其他土层变化较小。在 0—20 cm 土层,100 年

和 18 年农田硝态氮浓度呈现出先急剧降低后缓慢升高的趋势,2 年农田在灌浆期以前变化趋势与 100 年和 18 年农田类似,但在收获期铵态氮浓度明显降低。3 种农田铵态氮浓度的差异主要出现在 0—20 cm 土层,具体表现为三叶期和收获期 100 年最高,18 年其次,2 年最低;其他时期铵态氮浓度差异较小。

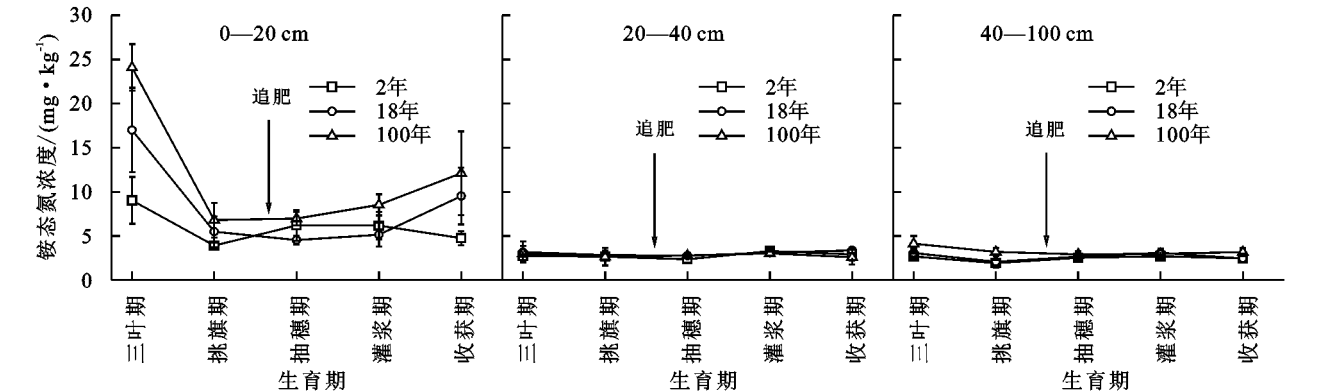


图 3 不同生育期土壤剖面铵态氮浓度分布

2.3 土壤硝态氮分布

各生育期不同水耕年限农田的硝态氮平均积累量均无显著差异,水耕 2 年、18 年和 100 年农田分别为 65.38,62.83,66.27 kg/hm²。三叶期各农田硝态氮积累量显著高于其他时期,在三叶期 2 年、18 年和 100 年农田硝态氮积累量分别为 115.2,118.9,107.8 kg/hm²(表 2),而拔节期至收获期硝态氮的平均积累量仅有 53.3,48.8,55.9 kg/hm²。在拔节期施肥后,各农田硝态氮积累量有不同程度的增加,水耕 2 年农田积累量上升 34.99%,高于 18 年(6.46%)和 100 年(10.27%)农田。

100 cm 土层分别为 3.71,3.38,3.29 mg/kg。各农田不同土层的硝态氮浓度随小麦生育期延伸表现出不同的变化趋势。对于 0—20 cm 土层,三叶期硝态氮浓度最高,而后急剧降低;除 2 年农田在抽穗期有明显的上升外,其他时期各农田硝态氮浓度波动幅度较小。对于 20—40 cm 土层,2 年农田硝态氮浓度表现为先降低后升高的趋势,100 年农田呈现先升高后缓慢降低的趋势,18 年农田表现为“W”形的往复波动。40—100 cm 土层农田硝态氮含量波动较小。不同水耕年限农田硝态氮浓度的差异主要出现在 0—20 cm 土层,具体表现为三叶期 18 年和 100 年高于 2 年农田、抽穗期 2 年农田高于 18 年和 100 年,其他时期硝态氮浓度差异较小。

2.4 小麦产量及其构成要素

不同农田的小麦产量随水耕年限的增加而显著

3 种水耕年限农田的土壤硝态氮浓度均随土层深度的增加而减小,这种趋势在三叶期最为明显(图 4)。2 年、18 年和 100 年农田 0—20 cm 土层硝态氮平均浓度分别为 12.26,12.74,14.88 mg/kg,而 20—

降低(表 3)。此外,小麦产量各构成要素也因水耕年限而异。各农田小麦籽粒的千粒重无显著差异;水耕 2 年农田的小麦穗粒数和单株产量显著高于 18 年和

100 年农田,而 18 年和 100 年农田无显著差异;3 种农田的有效穗数差异显著,2 年农田每平方米有效穗数比 18 年和 100 年农田分别多 134 穗和 190 穗。

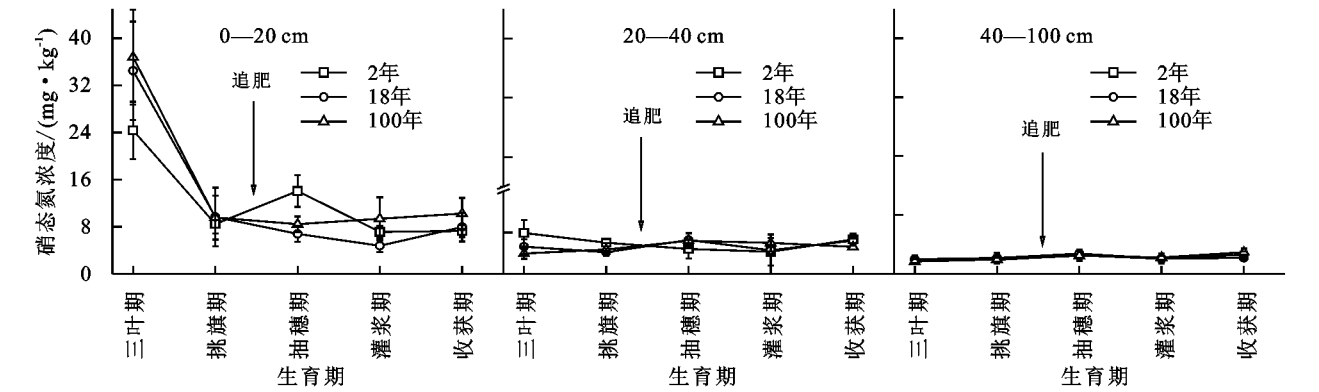


图 4 不同生育期土壤剖面硝态氮浓度分布

表 3 不同水耕年限农田小麦产量与产量构成

农田类型	产量/ (kg·hm ⁻²)	千粒 质量/g	单穗 粒数/颗	单株 产量/g	有效穗数/ (穗·m ⁻²)
2 年	4068±14 ^a	42.02±3.86 ^a	26±3.01 ^a	1.21±0.11 ^a	493±3 ^a
18 年	3080±35 ^b	40.57±0.66 ^a	21±0.34 ^b	0.79±0.01 ^b	360±6 ^b
100 年	2469±10 ^c	39.66±1.53 ^a	19±0.71 ^b	0.81±0.03 ^b	303±5 ^c

注:表中数据后不同字母表示不同水耕年限差异显著(P<0.05)。

3 讨论

3.1 作物生长、环境因子和农田水耕年限对土壤水分与氮素分布的影响

麦季农田土壤水分含量受作物生长、环境因子和水耕年限的影响显著。3 种农田土壤水分含量的急剧下降主要发生在三叶期至孕穗期,而后期变化较小。从三叶期至孕穗期,小麦生物量和叶面积指数迅速增加,大量土壤水分被根系吸收后以蒸腾形式散发^[19];且此时降雨较少(图 1),土壤水分受降雨补充有限,导致土壤水分含量的持续降低。由于生育前期小麦根系分布较浅,植物蒸腾的水分主要来源于浅土层,因此 0—20 cm 土层的水分含量下降速率较下层土壤快。在整个生育期,农田平均含水量随水耕年限的延长而增大。这是由于水耕年限的延长促进犁底层发育,其土壤容重增加,K_s降低,进而阻止水分的下渗,Janssen 等^[15]和杨燕等^[17]的研究也证实了这一点。犁底层对水分下渗的阻挡最终导致水耕 100 年农田 0—20 cm 土层的水分含量最高,18 年其次,2 年最低。而 3 种农田 20 cm 以下土层含水量差异较小,这可能是由于研究区地下水位较浅,下层土壤的含水量变化主要受毛管上升水影响。

麦季农田土壤氮素浓度和形态主要受氮肥施用、作物生长与水耕年限影响。在基肥施用和第 1 次追肥时期,小麦植株对肥料吸收作用较弱,因此在三叶期各农田氮素均有大量积累(图 3 和图 4)。随着生育期的延伸,氮素被小麦植株大量吸收,导致硝态氮

和铵态氮含量急剧降低。在第 2 次追肥后,土壤氮素得到部分补充,因此氮素浓度又出现小幅度上升。由于肥料主要施用 in 表层土壤,故 0—20 cm 土层氮素含量波动幅度较深层大。而铵态氮易被土壤吸附的特点^[20]导致其主要分布在 0—20 cm 土层,下层土壤浓度变化很小,陈效民等^[21]的研究也有类似发现。尽管硝态氮易随水分渗漏而淋失,但 40 cm 以下土层硝态氮浓度未见明显波动,这可能是由于根系吸收减少了硝态氮的淋洗。吕璞^[22]在江汉平原的研究中发现,小麦生长季硝态氮可以淋洗至 80 cm 以下土层,这可能是因为本研究区的地下水位更浅,导致土壤硝态氮淋失量小。犁底层对水分渗漏的阻挡效应也影响了农田氮素分布。随着水耕年限延长而逐渐发育的犁底层,对水分渗漏的阻挡效应也影响了农田氮素浓度与形态。在小麦三叶期及以前,0—20 cm 土层 100 年农田的氮素浓度(铵态氮与硝态氮之和)显著高于 18 年和 2 年农田,而在 20—40 cm 土层,氮素浓度表现为 2 年农田高于 18 年和 100 年农田,表明 2 年农田中有更多的氮素被淋洗至深层土壤。水耕年限不同造成的土壤水分含量差异也影响了土壤的氮素形态,特别是在 0—20 cm 土层。100 年农田最高的含水量条件意味着最差的土壤通气状况,进而削弱了氮素的硝化作用^[20],表现为硝态氮与铵态氮浓度的比值最低(1.27);而水耕 2 年农田的耕层土壤水分含量低于其他农田,因此硝态氮浓度与铵态氮浓度的比值最高(2.04)。

3.2 农田水耕年限对小麦产量的影响

本研究麦地的环境因子相同,而小麦产量随着农田水耕年限的增加而降低,表明水耕年限是影响小麦产量的重要因素。尽管 100 年农田的氮素含量经常高于 18 年和 2 年农田,但其小麦产量却低于后者,表明在目前的氮肥施用条件下氮素含量不是影响研究区小麦生长的主要因子。而 3 种农田的土壤含水量,特别是表层含水量有较大差异,表明其可能是影响其小麦产量的重要原因。小麦产量的高低,在很大程度上取决于根系的发育状况,根系发达、活性强是小麦高产的基础^[23]。以往研究^[24-25]表明,耕层土壤含水量的高低直接影响小麦总根数、根系总长、根系体积和根系干质量,过高的土壤水分含量会导致土壤空气不足,小麦根系活动受阻;且缺氧条件下土壤中还会产生大量还原性有毒物质,使根系受害。在本研究中,土壤含水量随水耕年限增加而显著升高,水耕 2 年、18 年和 100 年农田 0—20 cm 土层平均含水量分别是田间持水量的 80.51%, 94.08%, 94.48%。100 年和 18 年农田过高的土壤含水量导致氧气含量较低,对小麦根系生长和养分吸收可能产生了较大负面影响,进而影响小麦的产量。李彩霞等^[26]和 Araki 等^[27]发现,根系发育不良会造成小麦茎秆氮磷钾的含量降低,叶绿素分解、叶片生长停滞、气孔关闭,进而导致光合作用的下降,灌浆时间缩短,有效穗数和穗粒数降低,最终导致小麦产量降低;武文明等^[28]与向永玲等^[29]的研究也有类似发现,生育期渍水胁迫会导致小麦的不孕穗数增加和穗粒数降低,进而显著降低小麦产量;王小燕等^[30]和陈恢富等^[31]在江汉平原传统旱耕作农田的试验表明,小麦平均产量分别为 5 698, 5 812 kg/hm², 远高于本研究中 3 种稻麦轮作农田;而邹娟等^[8]在江汉平原典型稻麦轮作区的研究结果表明,其小麦产量(3 259 kg/hm²)明显低于王小燕等^[30]和陈恢富等^[31]研究的小麦产量,而与本研究中的水耕 18 年农田产量相近。与稻麦轮作农田相比,旱地往往还没有形成成熟的犁底层,土壤大孔隙也较多,因此通气状况更好,根系更为发达,最终可以形成更高的产量。由于过高的水分含量限制了研究区小麦产量,为解决这一问题,需要尽量降低表层土壤的含水量。尽管深耕打破犁底层可以有效降低耕层土壤的含水量,是提高小麦产量的一种有效方式^[32];但对于水旱轮作农田,犁底层的破坏会显著增加稻季土壤水分和氮素的渗漏。综合考虑,对于水耕年限较长的农田,不仅需要起高垄,还需要在垄间开挖排水沟,通过充分排水以降低表层土壤水分含量,进而减少渍害对小麦产量的影响。此外,由于研究区地下水位埋深浅,地下水也会对表层土壤水分进行补

给,还需要通过排水渠清淤与加强排水等方式降低区域性的地下水位,以进一步降低小麦渍害风险。

4 结 论

(1)不同水耕年限农田小麦生育期土壤剖面水、氮分布特征存在显著差异,犁底层的土壤性质差异是主要原因。0—20 cm 土层的水分含量和氮素浓度均随水耕年限的延长而增大,且铵态氮占比更高,而深层土壤的水、氮分布差异较小。

(2)不同水耕年限农田小麦产量差异显著,随水耕年限的延长而降低;影响小麦产量的主要原因是渍害而非氮素浓度,主要表现为降低了小麦的有效穗数和单株穗粒数。为降低渍害效应,对长水耕年限农田需要采取起高垄和开挖排水沟的方式进行小麦种植。

参考文献:

- [1] 敖立万,朱旭彤,高广金.湖北小麦[M].武汉:湖北省科学技术出版社,2002:194-226.
- [2] 孙继平,孙世清,唐先维,等.江汉平原小麦—早稻连作模式推广与运用[J].现代农业科技,2016(3):91-93.
- [3] Mueller N, Gerber J, Johnston M, et al. Closing yield gaps through nutrient and water management[J]. Nature, 2012, 490(7419): 254-257.
- [4] Qiu S J, Xie J G, Zhao S C, et al. Long-term effects of potassium fertilization on yield, efficiency, and soil fertility status in a rain-fed maize system in northeast China[J]. Field Crops Research, 2014, 163: 1-9.
- [5] 李友军,邹娟娟,牛凯丽,等.不同水分和氮素形态对郑麦 9023 花后旗叶衰老及产量的影响[J].水土保持学报, 2010, 24(4): 253-258.
- [6] 王磊,董树亭,刘鹏,等.水氮互作对冬小麦光合生理特性和产量的影响[J].水土保持学报, 2018, 32(3): 304-311.
- [7] 王小燕,沈永龙,高春宝,等.氮肥后移对江汉平原小麦籽粒产量及氮肥偏生产力的影响[J].麦类作物学报, 2016, 30(5): 896-899.
- [8] 邹娟,高春保,董凡,等.湖北省稻茬麦区秸秆还田替代钾肥效果[J].湖北农业科学, 2016, 55(24): 6398-6417.
- [9] 杨蕊,耿石英,王小燕.江汉平原不同氮肥运筹模式下豆麦和稻/麦轮作系统小麦产量和经济效益差异[J].应用生态学报, 2020, 31(2): 441-448.
- [10] 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: 255-270.
- [11] 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.
- [12] Paul W, Thomas K. Soil compaction and root growth: A review[J]. Agronomy Journal, 1994, 86(5): 759-776.
- [13] Bernd S, Harald S, Reinhold G, et al. Root production and root mortality of winter wheat grown on sandy and loamy soils in different farming systems[J]. Biology and Fertility of Soils, 2001, 33(4): 331-339.

- [16] 高儒学,戴全厚,甘艺贤,等.不同雨强下喀斯特坡耕地养分流失特征研究[J].土壤学报,2019,56(5):1072-1084.
- [17] Yan Z J, Chen S, Li J L, et al. Manure and nitrogen application enhances soil phosphorus mobility in calcareous soil in greenhouses[J].Journal of Environmental Management,2016,181:26-35.
- [18] 张倩,韩贵琳,柳满,等.贵州普定喀斯特关键带土壤磷分布特征及其控制因素[J].生态学杂志,2019,38(2):15-22.
- [19] 彭梦玲,吴磊,乔闪闪.不同雨强下黄土裸坡水—沙—氮磷流失耦合模拟[J].中国环境科学,2018,38(3):1109-1116.
- [20] 左继超,郑海金,奚同行,等.自然降雨条件下红壤坡地磷素随径流垂向分层输出特征[J].环境科学,2017,38(10):4178-4186.
- [21] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [22] Udawatta R P, Motavalli P P, Garrett H E. Phosphorus loss and runoff characteristics in three adjacent agricultural watersheds with claypansoils [J]. Journal of Environmental Quality,2004,33(5):1709-1719.
- [23] 司友斌,王慎强,陈怀满.农田氮、磷的流失与水体富营养化[J].土壤,2000(4):188-193.
- [24] Yang L X, Yang G S, Li H P, et al. Effects of rainfall intensities on sediment loss and phosphorus enrichment ratio from typical land use type in Taihu Basin, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020,27:12866-12873.
- [25] Cheng Y T, Li P, Xu G C, et al. Effects of soil erosion and land use on spatial distribution of soil total phosphorus in a small watershed on the Loess Plateau, China[J].Soil and Tillage Research,2018,184:142-152.
- [26] Wang G Q, Wu B B, Zhang L, et al. Role of soil erodibility in affecting available nitrogen and phosphorus losses under simulated rainfall[J].Journal of Hydrology,2014,514:180-191.
- [27] 张晓艳,李琴书.不同土地利用方式对土壤侵蚀及养分流失的影响[J].水土保持研究,2018,25(5):12-17.
- [28] Zhou B, Vogt R D, Lu X Q, et al. Land use as an explanatory factor for potential phosphorus loss risk, assessed by P indices and their governing parameters[J]. Environmental Science Processes and Impacts,2015,17(8):1443-1454.
- [29] Chen Z J, Wang L, Weu A S, et al. Land-use change from arable lands to orchards reduced soil erosion and increased nutrient loss in a small catchment[J].Science of The Total Environment,2019,648:1097-1104.

(上接第 264 页)

- [14] 湖北省统计局.湖北统计年鉴[J].北京:中国统计出版社,2018.
- [15] Janssen M, Lennartz B. Horizontal and vertical water and solute fluxes in paddy rice fields[J].Soil and Tillage Research,2007,94(1):133-141.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 张君,刘目兴,易军,等.不同植稻年限土壤剖面基本性质与水—氮分布的关系[J].土壤,2019,51(6):1188-1194.
- [19] 陈若礼,訾秀华.耕层土壤水分含量与小麦出苗和生长发育的关系[J].安徽农业科学,1999,27(2):150-151.
- [20] 马洪斌,李晓欣,胡春胜.中国地下水硝态氮污染现状研究[J].土壤通报,2012,43(6):258-262.
- [21] 陈效民,吴华山,孙静红.太湖地区农田土壤中铵态氮和硝态氮的时空变异[J].环境科学,2006,27(6):1217-1222.
- [22] 吕璞.江汉平原小麦不同氮肥运筹模式研究[D].武汉:长江大学,2017.
- [23] 于振文.作物栽培学各论[M].北京:中国农业出版社,2003:32-33.
- [24] 王亚萍,胡正华,张雪松,等.土壤水分胁迫对冬小麦根系分布规律的影响[J].江苏农业科学,2016,44(11):67-71.
- [25] 孙存华,白嵩,白宝璋,等.水分胁迫对小麦幼苗根系生长和生理状态的影响[J].吉林农业大学学报,2003,25(5):485-489.
- [26] 李彩霞,周新国,王和州,等.小麦花后淹水胁迫对根区土温及籽粒灌浆的影响[J].麦类作物学报,2013,33(6):1232-1236.
- [27] Araki H, Hamada A, Hossain M A, et al. Water logging at jointing and/or after anthesis in wheat induces early leaf senescence and impairs grain filling[J].Field Crops Research,2012,137(20):27-36.
- [28] 武文明,李金才,陈洪俭,等.氮肥运筹方式对孕穗期受渍冬小麦穗部结实特性与产量的影响[J].作物学报,2011,37(10):1888-1896.
- [29] 向永玲,方正武,赵记伍,等.灌浆期涝渍害对弱筋小麦籽粒产量及品质的影响[J].麦类作物学报,2020,40(6):730-736.
- [30] 王小燕,高春保,卢碧林,等.江汉平原小麦开花前降水分布特点及同期渍害的产量效应[J].长江流域资源与环境,2013,22(12):1642-1642.
- [31] 陈恢富,王小燕,高春保,等.不同种植密度对江汉平原地区小麦产量的影响[J].长江大学学报(自然科学版),2014,11(17):4-7.
- [32] 翟振,李玉义,逢焕成,等.黄淮海北部农田犁底层现状及其特征[J].中国农业科学,2016,49(12):2322-2332.