

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.14.0166



地下水位调控对冬小麦排水中 氮磷浓度的影响

徐翠兰¹, 孙振海², 孟佳佳³

(1. 江苏省土地开发整理中心, 江苏 南京 210017; 2. 嘉兴市杭嘉湖南排工程桐乡河道管理站, 浙江 桐乡 314500; 3. 淮安市水利规划办公室, 江苏 淮安 223005)



徐翠兰

摘要: 为了寻找减少氮磷流失的最优控水方式, 采用田间试验研究不同地下水位控制对冬小麦地氮磷流失的影响. 研究表明, 不同控水方式对冬小麦地排水中氮磷浓度影响明显. 经地下水位控制, 冬小麦各生育期地下排水中的氨态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)质量浓度降低, 而硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)质量浓度则有所增加; 拔节孕穗期保持水位 100 mm 处理排水总磷(TP)质量浓度增加, 抽穗开花期排水 TP 质量浓度降低; 拔节孕穗期保持水位 -200 mm 处理 TP 质量浓度降低, 抽穗开花期则有所增加. 冬小麦地土壤速效氮质量比在拔节孕穗期有所减少, 抽穗开花期保持高水位有利于速效氮质量比降低, 拔节孕穗期土壤中的速效磷质量比都有一定幅度的降低, 抽穗开花期保持高水位有利于速效磷质量比降低, 在水位较低的情况下, 控水时间越长, 速效磷质量比越大.

关键词: 冬小麦; 地下水位; 控水方式; 氮磷流失

中图分类号: S277.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2015)10-0887-08

徐翠兰, 孙振海, 孟佳佳. 地下水位调控对冬小麦排水中氮磷浓度的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33(10): 887-894.

Xu Cuilan, Sun Zhenhai, Meng Jijia. Influence of underground water level regulation on nitrogen and phosphorus concentration of drainage in winter wheat fields[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering (JDIME), 2015, 33(10): 887-894. (in Chinese)

Influence of underground water level regulation on nitrogen and phosphorus concentration of drainage in winter wheat fields

Xu Cuilan¹, Sun Zhenhai², Meng Jijia³

(1. Jiangsu Provincial Center for Land Consolidation and Rehabilitation, Nanjing, Jiangsu 210017, China; 2. Jiaxing Tongxiang Riverway Precinct of the South Drainage Project in Hangzhou, Tongxiang, Zhejiang 314500, China; 3. Huai'an Water Resources Planning Office, Huai'an, Jiangsu 223005, China)

Abstract: To seek the optimal water control mode for reducing the nitrogen and phosphorus losses, so as to achieve high yield, pollution reduction, and water saving, the effect of nitrogen and phosphorus losses in winter wheat was studied by different field groundwater table controls. The results show that different water control patterns have an obvious effect on nitrogen and phosphorus concentration in winter wheat. Through the control of underground water, ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) in underground drainage at different growth stages of winter wheat is decreased, but the nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) is increased. Total phosphorus (TP) concentration of water treatment with the water level of 100 mm kept

收稿日期: 2014-10-09; 网络出版时间: 2015-09-29

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20150929.2112.020.html>

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2009BAC55B06)

作者简介: 徐翠兰(1975—),女,山西五台人,高级工程师,硕士研究生(85767393@qq.com),主要从事农业水土资源规划、耕地保护、土地综合整治研究.

孙振海(1976—),男,河北滦南人,高级工程师(263018216@qq.com),主要从事河道管理、水利工程运行研究.

increasing at the jointing – booting stage and kept decreasing at the heading – flowering stage, while that with the water level of –200 mm kept decreasing at the jointing – booting stage, but kept increasing at the heading – flowering stage. Soil available nitrogen content of winter wheat was reduced at the jointing – booting stage. Maintaining high water level at the heading – flowering stage was conducive to reduce the available nitrogen content. Available phosphorus content at the jointing – booting stage in soil was reduced to a certain extent. Maintaining high water level at the heading – flowering stage can reduce the available phosphorus content. At the lower water level, the longer the water control time was, the greater the available phosphorus content was.

Key words: winter wheat; underground water level; water control mode; nitrogen and phosphorus losses

氮、磷都是植物必需的营养元素,也是植物需要量和收获时带走量较多的营养元素^[1-3].随着化肥工业的发展,化肥施用水平不断提高,在单一施用氮肥的情况下,土壤表现出缺磷、缺钾的现象,破坏了养分平衡,植物生长受到明显的抑制,产量无法再提高.农田因使用过量的农药和化肥,产生的大量有毒农药和氮、磷等营养物质造成了水体污染,从而降低了作物的产量和质量^[4-8].为了提高小麦质量和产量,满足人们的物质需求,一方面要节水灌溉^[9-10],另一方面要减少水体污染,而控制排水是满足以上条件的可行措施之一^[11-12].文中主要研究地下水位控制对冬小麦地氮、磷流失的影响,从而揭示农田水位调控下冬小麦地下排水及不同土层土壤氮、磷元素的变化规律.

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于河海大学江宁校区的节水园区

(118°60'E, 31°86'N),属于亚热带湿润性季风气候,多年平均降雨量为1 021.3 mm,多年平均蒸发量为900 mm,多年平均气温为15.7℃,多年平均日照时数为2 212.8 h,多年平均无霜期为237 d.试验园区有32个蒸渗测坑,其长、宽、深分别为2.5, 2.0, 2.0 m.试验园地面设移动式雨棚,中间设地下设备间和地下廊道.蒸渗测坑内土壤pH值为6.97,土壤容重为1.46 g/cm³,总孔隙度为44.97%,田间持水率为25.28%,土壤有机质质量比为21.88 g/kg、全氮质量比为0.90 g/kg、全磷质量比为0.32 g/kg.

1.2 试验设计

试验采用扬麦14作为供试小麦,根据冬小麦各生育阶段的特点,将冬小麦试验划分为6个生育阶段,即出苗越冬期、返青分蘖期、拔节孕穗期、抽穗开花期、乳熟期和黄熟期.根据冬小麦需水规律,本次试验处理共有13组,其中1组CK为对照组,每个处理设置4个重复.控制标准为每个生育期的设计水位,涝渍排水控制结束后,让水位自然下降,水位调控方案见表1.

表1 农田控水试验方案(2011)
Tab.1 Water level control programs in farmland (2011)

处理	分蘖期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期
1	50 (1 d) (5 d - 200)	< -800	< -1 000	< -1 000
2	-200 (3 d) (5 d - 400)	< -800	< -1 000	< -1 000
3	-200 (3 d) (5 d - 600)	< -800	< -1 000	< -1 000
4	< -600	100 (1 d) (5 d - 400)	< -1 000	< -1 000
5	< -600	-200 (3 d) (5 d - 600)	< -1 000	< -1 000
6	< -600	-200 (3 d) (5 d - 800)	< -1 000	< -1 000
7	< -600	< -800	100 (1 d) (5 d - 400)	< -1 000
8	< -600	< -800	-200 (3 d) (5 d - 600)	< -1 000
9	< -600	< -800	-200 (3 d) (5 d - 800)	< -1 000
10	< -600	< -800	< -1 000	100 (1 d) (5 d - 400)
11	< -600	< -800	< -1 000	-200 (3 d) (5 d - 600)
12	< -600	< -800	< -1 000	-200 (3 d) (5 d - 800)
CK	< -600	< -800	< -1 000	< -1 000

注:各处理水深以田面为基准面,正值为田面以上水位,负值为田面以下水位.

如第1组,分蘖期进行控水处理,田面先淹水50 mm (1 d),淹水结束后,地下水位在5 d内逐渐回到土层以下200 mm;在拔节孕穗期,水位控制在至少土层以下800 mm;在抽穗开花期和乳熟期,水位控制在至少土层以下1 000 mm.控水结束后,水位均调整至正常水位,即对照组CK.文中主要分析了处理4-9的研究结果.各控水处理结束后,分蘖期水位调整为至少土层以下600 mm,拔节抽穗期水位调整为至少土层以下800 mm,抽穗开花期和乳熟期水位均调整为至少土层以下1 000 mm.具体的控水时间见表2.

表2 冬小麦各生育期控水时间表
Tab.2 Water control time at different growth stages of winter wheat

年份	生育阶段	返青分蘖期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期
2011	起时	3月28日	4月8日	4月21日	5月20日
	止时	4月6日	4月15日	4月28日	5月28日

1.3 观测指标及分析方法

试验在蒸渗仪内进行,在地下廊道的取水管处采集地下水.先将补水阀门关上,再拧开阀门边的取水管螺帽,等地下水溢出变清澈后用聚乙烯瓶收集水样400 mL左右.聚乙烯瓶事先贴有标签,标签记录有水样来源、样品编号、采样地点、采样时间等信息.采集后在48 h内进行分析.采集水样的频率为隔天1次,每次在排水的中间时段取样.水环境测定的指标有氨态氮、硝态氮及总磷质量浓度,其中 NH_4^+ -N采用絮凝沉淀纳氏试剂光度法, NO_3^- -N采用麝香草酚分光光度法,TP采用过硫酸钾消解钼锑抗分光光度法^[13].在测坑内用土钻分层采集[0, 20), [20, 40), [40, 70] cm处的土样.将土样保存在标有土样来源、样品编号、采样时间等信息的纸袋里.采集的土样及时进行风干,风干后的土样进行磨细过筛处理,最后装入封口袋中.采集土样的时间为每次控水开始、中间、结束.土环境测定的指标有碱解氮、速效磷的质量浓度.其中碱解氮质量浓度测定采用碱解扩散法,速效磷质量浓度测定采用分光光度法.

2 结果分析

2.1 地下水位控制对排水中 NH_4^+ -N的影响

冬小麦各生育期不同处理排水中 NH_4^+ -N质量浓度 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 变化如图1所示.可以看出不同控水处理 NH_4^+ -N质量浓度与对照处理CK比较

都有所减少.拔节孕穗期处理4 NH_4^+ -N质量浓度呈现先下降后回升趋势,与对照处理CK比较:处理4淹水1 d NH_4^+ -N质量浓度增加,随着水位的回落, NH_4^+ -N质量浓度快速下降,控水结束后 NH_4^+ -N质量浓度略有下降但幅度不大.此外,处理4 NH_4^+ -N质量浓度变化趋势比CK平缓.处理5和处理6 NH_4^+ -N质量浓度变化平稳,呈现先小幅度增加后下降趋势,与CK比较:处理5和处理6在保持水位-200 mm 3 d后, NH_4^+ -N质量浓度随水位回落快速降低.抽穗开花期,处理7 NH_4^+ -N质量浓度变化呈现逐渐增加趋势.与对照处理CK比较:处理7淹水100 mm 1 d后, NH_4^+ -N质量浓度有所降低,随水位回落,在控水中期氨氮质量浓度快速下降,控水结束时 NH_4^+ -N质量浓度大幅度增加.此外,处理7 NH_4^+ -N质量浓度变化稳定,逐渐增加.处理8和处理9 NH_4^+ -N质量浓度与CK比较:保持水位-200 mm 3 d后, NH_4^+ -N质量浓度快速降低,随着水位的回落, NH_4^+ -N质量浓度虽然有所增加,但仍低于对照处理CK.不同处理下冬小麦地中的排水 NH_4^+ -N质量浓度从大到小为拔节孕穗期、抽穗开花期,说明小麦抽穗开花期比拔节孕穗期对 NH_4^+ -N需求量大.在各生育期不同处理下冬小麦排水 NH_4^+ -N质量浓度从大到小为CK, 100 mm, -200 mm,说明经过水位控制能有效地减少氮素流失^[14-15].

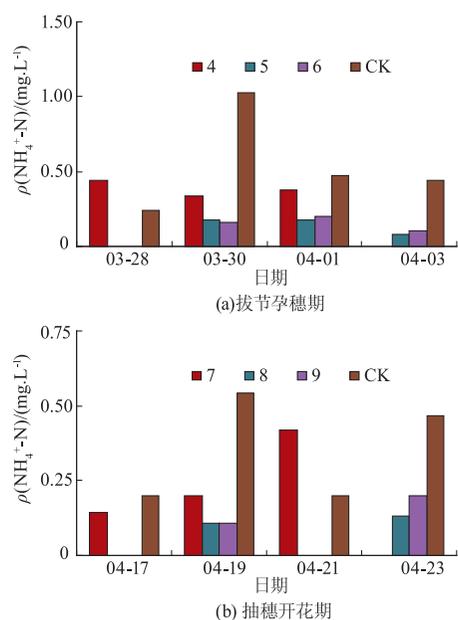


图1 冬小麦各生育期不同处理排水中 NH_4^+ -N质量浓度变化

Fig.1 NH_4^+ -N changes at different growth stages of winter wheat in drainage water

2.2 地下水位控制对排水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的影响

冬小麦各生育期不同处理排水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 质量浓度 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 变化如图2所示。

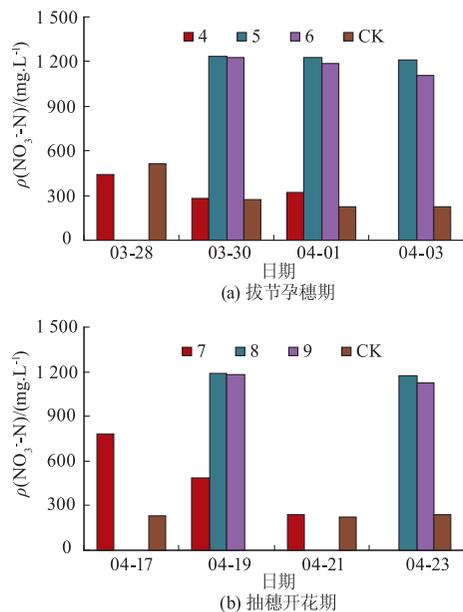


图2 冬小麦各生育期不同处理排水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 质量浓度变化
Fig.2 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ changes at different growth stages of winter wheat in drainage water

可以看出,不同处理冬小麦排水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 质量浓度与对照处理 CK 相比大幅度增加. 拔节孕穗期,处理4 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 质量浓度先降后升,与 CK 比较:淹水 100 mm 1 d 后, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 质量浓度有所下降,在水位回落中期,两者趋于持平,结束时 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 质量浓度增加. 处理5 和处理6 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 质量浓度变化平缓,与 CK 比较:保持水位 -200 mm 3 d 后, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 质量浓度大幅度增加,水位回落期间也呈现增加趋势. 抽穗开花期,处理7 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 质量浓度逐渐下降,与 CK 比较:在淹水 100 mm 1 d 后, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 质量浓度大幅度增加,随着水位的回落,逐渐降低,与对照处理 CK 趋于持平. 此外,不同处理冬小麦 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 质量浓度从大到小为 -200 mm, 100 mm, CK, 说明在经过处理的测坑排水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 质量浓度增加,且 -200 mm 水位控制处理增加幅度最大^[16].

2.3 地下水位控制对排水中 TP 质量浓度的影响

冬小麦各生育期不同处理排水中 TP 质量浓度变化如图3所示. 从图中可以看出,不同处理冬小麦排水中 TP 质量浓度变化规律不明显. 拔节孕穗期,处理4 TP 质量浓度平稳上升,与对照处理 CK 比较,淹水 100 mm 1 d 后,处理4 TP 质量浓度有所下

降,随着水位的回落 TP 质量浓度呈现增加趋势,控水结束时 TP 质量浓度超过 CK. 处理5 TP 质量浓度呈现先下降后上升趋势,与 CK 比较,处理5 TP 质量浓度在控水期间先降后升,但总体均略低于对照处理 CK. 处理6 TP 质量浓度与 CK 比较,在保持 -200 mm 3 d 后有所增加,水位回落后则有所下降. 抽穗开花期,处理7 TP 质量浓度呈现先升后降趋势,与 CK 比较,处理7 TP 质量浓度,无论在淹水期间还是水位回落期间均低于 CK. 处理8 的总磷质量浓度与 CK 比较,在保持水位 -200 mm 期间,有所增加;在水位回落之后则有所降低. 处理9 的总磷质量浓度与 CK 比较,在保持水位 -200 mm 期间,有所减少;在水位回落之后则有所升高.

此外,不同处理排水中 TP 的质量浓度从大到小均为抽穗开花期,拔节孕穗期;拔节孕穗期不同处理下冬小麦排水 TP 的质量浓度从大到小为 CK, 100 mm, -200 mm, 而抽穗开花期则为 -200 mm, CK, 100 mm.

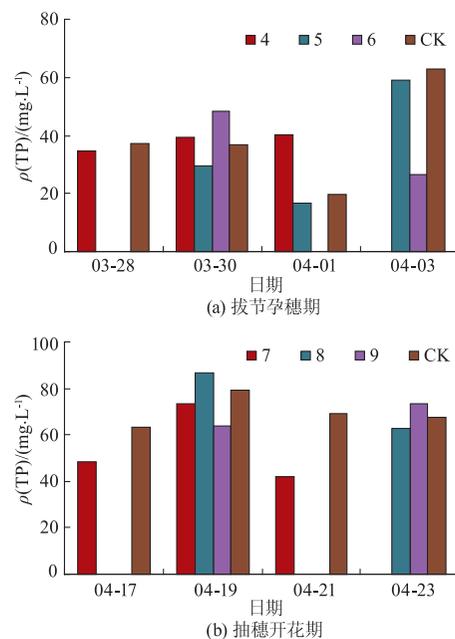


图3 冬小麦各生育期不同处理排水中 TP 质量浓度变化
Fig.3 TP changes at different growth stages of winter wheat in drainage water

2.4 地下水位控制对冬小麦土壤氮素分布的影响

冬小麦各生育期不同土层土壤速效氮质量比 $\omega(\text{N})$ 变化如图4所示. 在 $[0, 20)$ cm 土层, 处理4 速效氮质量比与 CK 相比, 在控水期间先降后升, 控水前期明显降低, 降幅达到 47.7%, 在控水后期小幅度增加; 处理5 和处理6 速效氮质量比与 CK 比较均有所增加, 控水前期增加明显, 处理6 增加幅度

约为 18.6%,处理 5 增加幅度达到 38.4%左右,在控水后期处理 5 和处理 6 均略有增加.[20,40) cm 土层,处理 4、处理 5 和处理 6 速效氮质量比与 CK 相比在控水前期均有降低,处理 4 降低明显,降低幅度为 26.7%;控水后期处理 4 速效氮质量比急剧增加,而处理 5 和处理 6 则略有降低.[40,70] cm 土层,处理 4、处理 5 和处理 6 速效氮质量比与 CK 相比,在控水前期大幅度下降,处理 5 最为明显,下降幅度达到 69.6%;在控水后期,处理 4 较 CK 有小幅降低,处理 5 和处理 6 较 CK 则有一定幅度的增加.[20,40) cm 土层,处理 7 速效氮质量比与 CK 相比在控水期间均有降低,控水前期降低 28.4%,

控水后期降低 20.1%;处理 8 速效氮质量比与 CK 相比先升后降,在控水前期与 CK 持平,略有增加,在控水后期则有所下降,降低幅度约为 17.4%;处理 9 速效氮质量比在控水期间均有所降低,控水前后降低的幅度均为 13.5%左右.[40,70] cm 土层,处理 7 和处理 8 速效氮质量比与 CK 相比,在控水期间均有一定幅度的降低,在控水前期处理 7 下降幅度较处理 8 更为明显,在控水后期处理 8 下降幅度较处理 7 则更为明显一些;处理 9 速效氮质量比与 CK 相比在控水期间先升后降,在控水前期,处理 9 增加幅度为 26%左右,在控水后期处理 9 与 CK 的速效氮质量比持平。

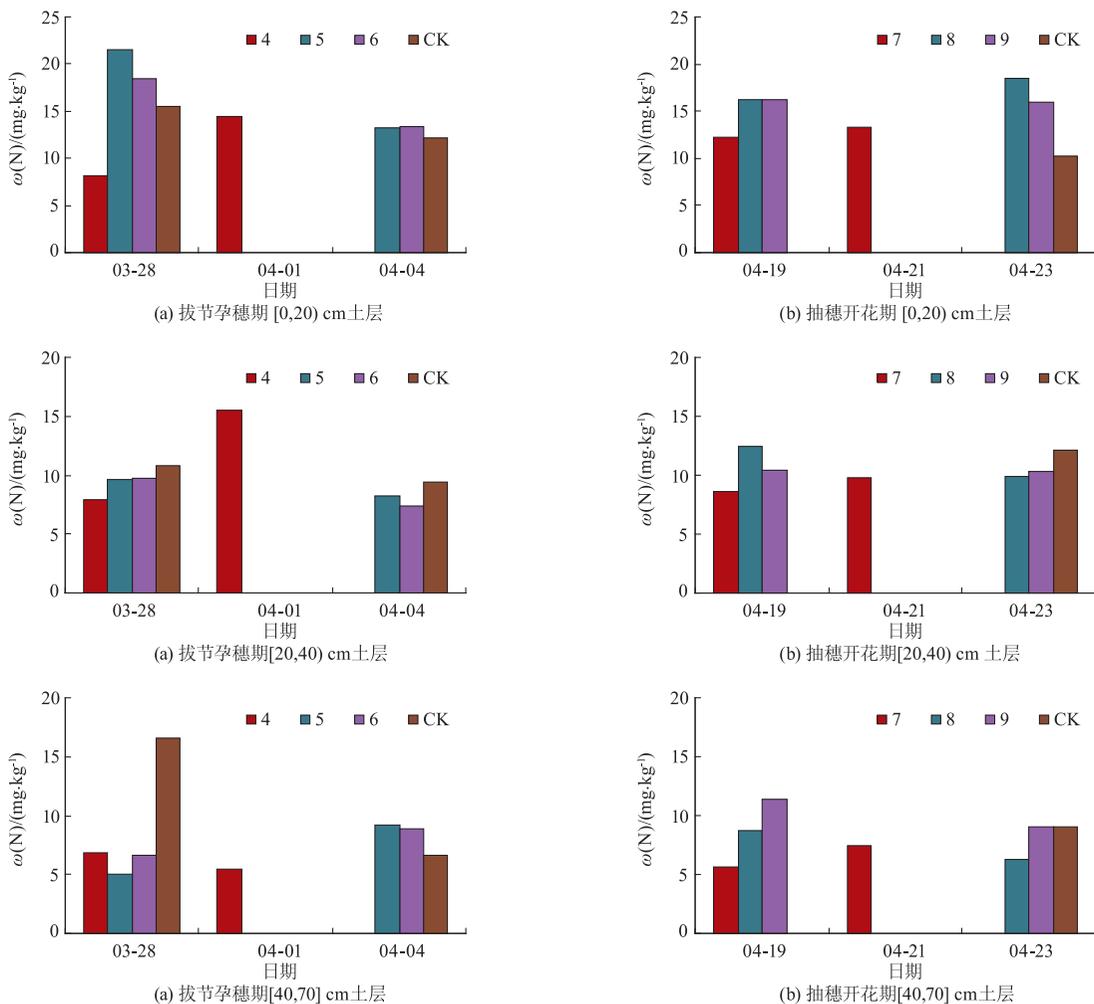


图 4 冬小麦各生育期不同土层土壤速效氮质量比变化
Fig. 4 Available nitrogen changes at different growth stages of winter wheat in different soil layers

总之,对冬小麦地进行地下水位的控制,对于冬小麦地土壤中的氮素质量比有一定的影响.经过淹水处理的测坑,浅层的土壤中速效氮质量比先是有所减少,控水结束后都有所增加,而[40,70] cm

处的速效氮质量比在控水结束后有所减少。
2.5 地下水位控制对冬小麦土壤磷素分布的影响
冬小麦各生育期不同土层土壤速效磷质量比 ω(P)变化如图 5 所示。

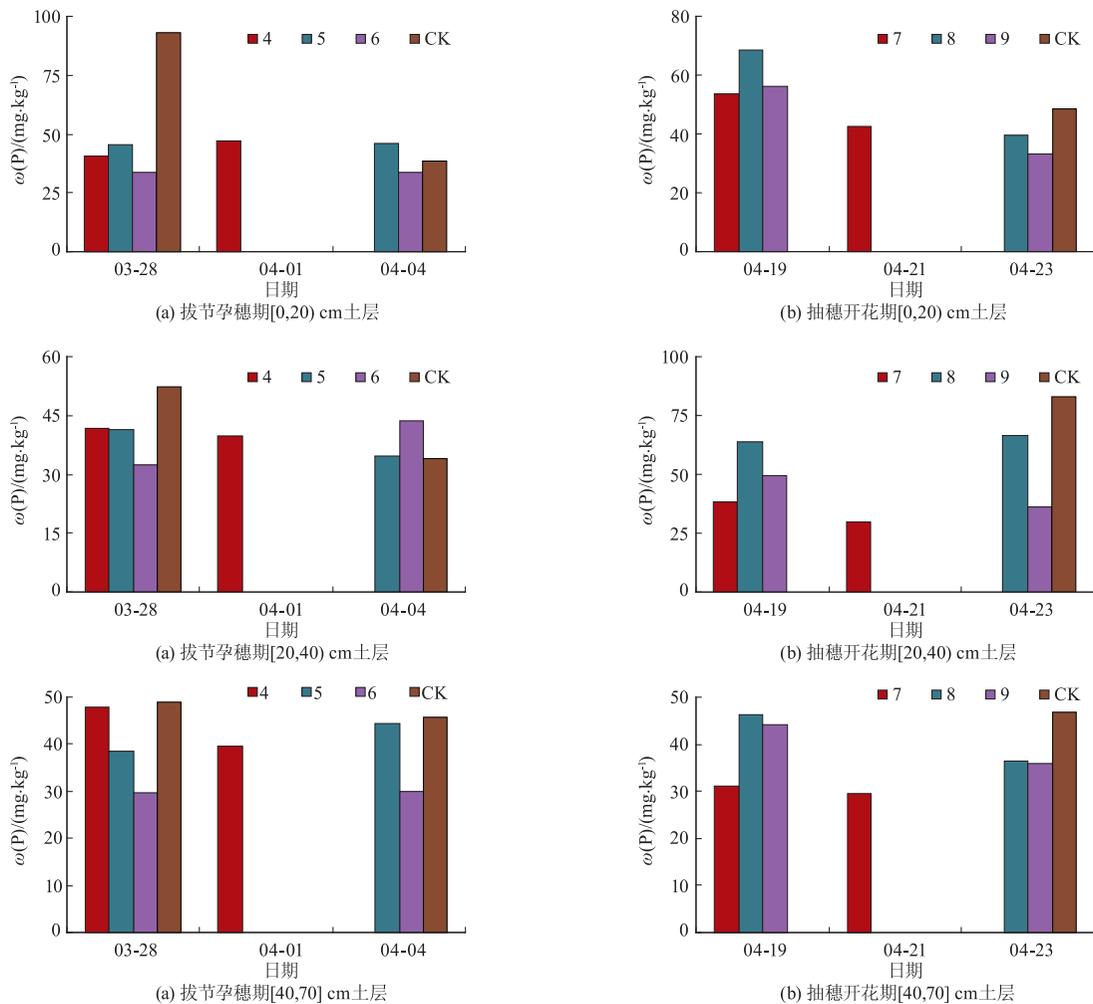


图5 冬小麦各生育期不同土层土壤速效磷质量比变化

Fig. 5 Available phosphorous changes at different growth stages of winter wheat in different soil layers

处理4在[0,20) cm土层中的速效磷质量比在控水期间逐渐增加,与CK组比较,其质量比有所降低;[20,40) cm中的速效磷质量比在控水期间保持稳定,在控水前期较CK降低,随着水位的回落,与CK渐渐持平;在[40,70] cm土层中速效磷质量比在控水期间逐渐降低,与CK相比,有一定幅度的减小.处理5在[0,20) cm土层中速效磷质量比在控水期间保持稳定,与CK组相比,其质量比降低一半左右,在控水后期则有一定幅度的增加;在[20,40) cm土层中速效磷质量比逐渐降低,与CK相比,在控水前期有所降低,在后期则达到持平状态;在[40,70] cm土层中速效磷质量比逐渐增加,与CK相比,在控水前期降低,在后期则两者持平.处理6在[0,20) cm土层中速效磷质量比变化平缓,与CK相比,在控水前期有大幅度降低,降低幅度在80%以上,在后期有一定的增加;在[20,40) cm土层中速效磷质量比逐渐增加,与CK相比,在控水前期降

低30%左右,而在后期则增加30%左右;土壤[40,70] cm土层中速效磷质量比保持稳定,与CK相比,在控水前后均降低40%左右.处理7在[0,20) cm土层中速效磷质量比逐渐降低,与CK相比变化不大;在[20,40) cm土层中速效磷质量比保持稳定,略有降低,与CK相比,其质量比有明显的变化,在控水前后较CK降低,降低幅度均达到50%以上;在[40,70] cm土层中速效磷质量比几乎不变,与CK组相比,有一定幅度的降低.处理8在[0,20) cm土层中速效磷质量比变化明显,逐渐降低,与CK相比,其质量比在控水前期有一定幅度的增加,而在后期则有一定幅度的降低;在[20,40) cm土层中速效磷质量比有大幅度的增加,与CK相比,其质量比在控水前期有小幅度降低,而在后期则有大幅度增加;在[40,70] cm土层中速效磷质量比逐渐降低,与CK相比,其质量比在控水前期持平,在后期则有所降低.处理9在[0,20) cm土层中速效磷质

量比逐渐降低,与 CK 相比,在控水前期基本持平,而在后期则有一定程度降低;在[20,40) cm 土层中的速效磷质量比逐渐降低,与 CK 相比,在控水前期降低 30% 左右,在后期则降低 50% 左右;在[40,70] cm 土层中速效磷质量比逐渐降低,与 CK 相比,在控水前后期均有降低。

3 结 论

文中通过对冬小麦地下水位控制,采取不同的控水方式,对冬小麦地排水和土壤的氮磷含量进行分析研究,总结如下:

1) 经过地下水位控制,冬小麦地排水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 质量浓度在各生育期均有所降低。总体上,拔节孕穗期降幅较大,抽穗开花期则次之。经过保持水位 -200 mm 处理比保持水位 100 mm 处理 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 质量浓度降低的效果更明显; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 质量浓度均有所增加,经过保持水位 -200 mm 处理比保持水位 100 mm 处理 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 质量浓度增加更加明显,TP 质量浓度在各生育期均有所变化,保持水位 100 mm 处理 TP 质量浓度在拔节孕穗期增加,抽穗开花期降低,保持水位 -200 mm 处理 TP 质量浓度在拔节孕穗期降低,在抽穗开花期则有所增加,且变化的幅度不大。

2) 不同地下水位调控对冬小麦土壤中速效氮有着一定的影响。拔节孕穗期,冬小麦不同土层土壤中速效氮质量比均有所降低,不同控水方式不同,影响效果不同,保持水位越高,速效氮质量比降低幅度越大。冬小麦土壤中速效磷质量比对于地下水位变化敏感,不同的控水方式结果有着明显的差别。拔节孕穗期,水位控制下冬小麦不同土层土壤中速效磷质量比都有一定幅度的降低,抽穗开花期,不同的控水方式其影响不同,保持高水位,速效磷质量比降低;在水位低的情况下,保持时间长,则速效磷质量比增加。

参考文献 (References)

- [1] 邱建军,李虎,王立刚. 中国农田施氮水平与土壤氮平衡的模拟研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 40 - 44.
Qiu Jianjun, Li Hu, Wang Ligang. Simulation of nitrogen level and balance in cropland in China [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 40 - 44. (in Chinese)
- [2] 于红梅,李子忠,龚元石. 传统和优化水氮管理对蔬菜地土壤氮素损失与利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 51 - 59.
Yu Hongmei, Li Zizhong, Gong Yuanshi. Comparison of nitrogen loss and use efficiency of vegetable in vegetable field under traditional and improved water and N-fertilizer management [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(2): 51 - 59. (in Chinese)
- [3] 殷国玺,张展羽,郭相平,等. 地表控制排水对氮质量浓度和排放量影像的试验研究[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2006, 34(1): 21 - 24.
Yin Guoxi, Zhang Zhanyu, Guo Xiangping, et al. Experimental study on effect of controlled drainage from ground surface on concentration and discharge of nitrogen [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2006, 34(1): 21 - 24. (in Chinese)
- [4] 郭鸿鹏,朱静雅,杨印生. 农业非点源污染防治技术的研究现状及进展[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 290 - 295.
Guo Hongpeng, Zhu Jingya, Yang Yinsheng. Research status and development of technologies for controlling agricultural non-point source pollution [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(4): 290 - 295. (in Chinese)
- [5] Chirinda N, Cater M S, Albertb K R, et al. Emissions of nitrous oxide from arable organic and conventional cropping systems on two soil types [J]. Agric Ecosyst Environ, 2010, 136(3/4): 199 - 208.
- [6] Li Hua, Liang Xinqiang, Chen Yingxu, et al. Ammonia volatilization from urea in rice fields with zero-drainage water management [J]. Agric Water Manage, 2008, 95(8): 887 - 894.
- [7] Ni Wuzhong, Li Jianping, Zhu Zhaoliang. Occurrence of nitrification - denitrification and gaseous nitrogen loss process in flooded rice soil [J]. Prog Nat Sci, 2007, 17(1): 6 - 10.
- [8] Bouwman A F, Beusen A H W, Billen G. Human alteration of the global nitrogen and phosphorus soil balances for the period 1970 - 2050 [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2009, 23(4): 144 - 153.
- [9] Luederitz V, Eckert E, Lange - Weber M, et al. Nutrient removal efficiency and resource economics of vertical flow and horizontal flow constructed wetlands [J]. Ecological Engineering, 2001, 18(2): 157 - 171.
- [10] Leo J M, Boumans, Dico F, et al. Nitrate leaching in agriculture to upper groundwater in the sandy regions of the Netherlands during the 1992 - 1995 period [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2005, 102(1/2/3): 225 - 241.

- [11] 邵光成,俞双恩,刘娜,等.以涝渍连续抑制天数为冬小麦排水指标的试验[J].农业工程学报,2010,26(8):56-60.
Shao Guangcheng, Yu Shuang'en, Liu Na, et al. Study on continuous days of water logging and excessive soil water as drainage index of wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(8): 56-60. (in Chinese)
- [12] 杜文勇,何雄奎,胡振方,等.不同灌溉技术条件对冬小麦生产的影响[J].排灌机械工程学报,2011,29(2):170-173.
Du Wenyong, He Xiongkui, Hu Zhenfang, et al. Effect of different irrigation technology on production of winter wheat[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(2): 170-173. (in Chinese)
- [13] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1978.
- [14] Luo W, Jia Z, Fang S, et al. Outflow reduction and salt and nitrogen dynamics at controlled drainage in the Yin-Nan Irrigation District, China[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(7): 809-816.
- [15] Kröger R, Holland M M, Moore M T, et al. Hydrological variability and agricultural drainage ditch inorganic nitrogen reduction capacity[J]. Journal of Environmental Quality, 2007, 36(6): 1646-1652.
- [16] Xiao Menghua, Yu Shuang'en, She Dongli, et al. Nitrogen and phosphorus loss and optimal drainage time of paddy field under controlled drainage condition[J]. Arab J Geosci, 2015, 8(7): 4411-4420.

(责任编辑 徐云峰)

(上接第858页)

- [11] Zhang Qihua, Shi Weidong, Xu Yan, et al. A new proposed return guide vane for compact multistage centrifugal pumps[J]. International Journal of Rotating Machinery, 2013: 683713.
- [12] Gölcü M, Pancar Y, Sekmen Y. Energy saving in a deep well pump with splitter blade[J]. Energy Convers Manag, 2009, 50(11): 2728-2731.
- [13] Yan W, Shi D, Luo Z, et al. Three-dimensional CFD study of liquid-solid flow behaviors in tubular loop polymerization reactors: The effect of guide vane[J]. Chem Eng Sci, 2011, 66(18): 4127-4137.
- [14] 关醒凡.现代泵技术手册[M].北京:宇航出版社,1995:255-265.
- [15] 王洪亮,施卫东,陆伟刚,等.深井离心泵的水力设计和二次回归正交试验[J].排灌机械工程学报,2010,28(6):479-483.
Wang Hongliang, Shi Weidong, Lu Weigang, et al. Hydraulic design and quadratic regression orthogonal experiment of deep well centrifugal pumps[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(6): 479-483. (in Chinese)
- [16] 司乔瑞,袁寿其,王川,等.低比速多级潜水泵优化设计[J].农业工程学报,2012,28(8):122-127.
Si Qiaorui, Yuan Shouqi, Wang Chuan, et al. Optimal design of submersible multistage pumps with low specific speed[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(8): 122-127. (in Chinese)

(责任编辑 盛杰)