

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.04.010

控制排水条件下旱地排水及氮素流失规律研究

黄志强¹ 袁念念²

(1. 广西水利科学研究院水资源与节水灌溉技术研究所, 广西 南宁 530023 ;

2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要 :为探讨不同暗管控制水位对旱地排水、氮素流失过程和流失总量流失的影响,选取控制水位为地下 0 cm、30 cm、50 cm、80 cm、100 cm 的 5 块暗管排水棉花地进行对照试验,测定 2 a 棉花生育期内发生的 4 次较大规模排水过程的排水量、排水中氮素含量。结果表明,暗管排水条件下,暗管排水量高于地表径流排水量,且明显随控制水位的增加而降低,总排水量随暗管控制水位降低而有增加的趋势;各田块暗管排水中硝氮和全氮质量浓度变化规律明显,初始时较小,逐渐增大到峰值后又逐渐减少,暗管铵氮排放量与排水量明显呈线性相关,暗管径流氮素流失量总体上随暗管控制水位升高而减少。因此,适当提高暗管控制水位能减少旱地排水量和氮素流失量。

关键词 :棉田 控制排水 氮素流失 控制水位 控制排水水位

中图分类号 :X143

文献标志码 :A

文章编号 :1000-1980(2012)04-0412-08

Drainage and nitrogen loss in dry soils with controlled drainage

HUANG Zhiqiang¹, YUAN Niannian²

(1. Institute of Water Resources and Water-Saving Irrigation, Guangxi Hydraulic Research Institute, Nanning 530023, China ;

2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract : In order to analyze the effects of the controlled water levels of different subsurface drain pipes on the drainage, nitrogen loss, and the total amount of nitrogen loss in dry soils, comparison experiments were carried out in five cotton fields with controlled water levels of 0 cm, 30 cm, 50 cm, 80 cm, and 100 cm underground, respectively. The drainage discharge and nitrogen content during four large-scale drainage processes within a two-year cotton growth period were examined. The results show that under the condition of subsurface drain pipe drainage, the pipe drainage discharge was larger than the surface outflow, and it decreased with the rise of the controlled water level; the total drainage discharge had an increasing trend with the decrease of the controlled water level; the concentrations of nitrate and total nitrogen in the discharge flow changed significantly: they were low at the early drainage stage, then gradually increased up to their peak values, and finally decreased; the discharge of ammonia nitrogen in the subsurface drain pipe had a linear relationship with the drainage discharge; and the nitrogen loss decreased with the increase of the controlled water level. Therefore, an appropriate rise in the controlled water level can reduce both the drainage discharge and nitrogen loss in dry lands.

Key words : cotton field; controlled drainage; nitrogen loss; controlled water level; controlled drainage water level

近年来,随着我国农业产业化进程的加快,农业生产中化肥使用量逐渐增多,超量和超标的农田排水使河流、湖泊、土壤遭受严重的污染。2009 年农田灌溉耗水量占全国年耗水总量的 66.4%,排水率高达 37%^[1]。李凤华等^[1]研究发现,广西海洋入海污染负荷中 70% 以上来自入海河流,而河流中 90% 以上的污

染负荷来自农业面源污染。我国很多学者对农田氮素流失规律进行了研究。张福珠等^[2]的试验表明:通过土壤-植物系统流失的氮素以 NO_3^- -N 为主, NO_2^- -N 次之, NH_4^+ -N 只占很小部分。黄满湘等^[3]的研究表明:农田暴雨径流氮养分的流失量和累积径流量成正相关。张展羽等^[4]对南方红壤地区果园氮、磷流失的研究结果表明:水土流失是氮、磷流失的主要原因,采用草皮覆盖措施能有效减少氮磷流失。国内外大量研究结果表明^[5-10],通过在田间排水系统设置控制设施来调节田间地下水位,能起到实现排水再利用、治理渍害、减少排水对承泄区污染的作用。罗纨等^[11]以宁夏银北灌区为例,探讨了控制排水对于减少灌溉用水量及合理调节控制水位对于控制盐碱化的作用。殷国玺等^[12]在南方丘陵地区通过多目标控制排水模型探求了非劣控制排水时间。袁念念等^[13]也通过试验得出结论:实施控制排水可以减少排水量,从而减少氮素流失。本文通过对照试验,对水氮流失过程和流失量进行分析,探讨大田中水氮流失与地下水控制水位的关系。

1 试验方法

1.1 试验区概况

荆州丫角排灌试验站位于四湖水系中部,东经 $112^{\circ}31'$,北纬 $30^{\circ}21'$,海拔高程 29.4 m。试验场地傍靠四湖总干渠,地下水位常年较高。地势平坦,土壤肥沃,土质为中壤黏土,孔隙率为 65%,田间持水量 0~15 cm 内为 47.3%,16~40 cm 内为 30.7%。耕作层氮、磷、钾质量分数分别为 2.5,1.5,15 mg/kg。多年平均气温 16.5°C ,多年平均降雨量 1 122.0 mm,多年平均水面蒸发量 977.4 mm,多年平均日照时数为 1 552.0 h,无霜期 280 d 左右。站址在平原湖区具有一定的代表性。

1.2 试验田布置

试验田总面积 $3\,800\text{ m}^2$,长 76 m,宽 50 m,沿长度方向被分成 5 块相邻的田块,相邻田块之间用深 1.2 m、宽 0.2 m 的硬化水泥田埂加防渗膜分隔开,在田块的南端有一条 1.5 m 深的排水沟。试验田块由东向西依次编号为 E、A、B、C、D,其中 E 无地下暗管排水,可近似处理成控制水位为 0 的地下暗管排水,A、B、C、D 田块为地下暗管控制排水。控制排水田块埋设有 1 m 深的暗管,田块中间布置有地下水位观测井,具体布置见图 1。



图 1 试验田布置(单位:m)

Fig. 1 Layout of experimental plots(Unit: m)

试验设计将 A、B、C、D 田块的暗管排水水位分别控制在地面高程以下 30 cm、50 cm、80 cm、100 cm。为了控制不同田块的暗管出水水位,在控制排水田块暗管出口处安装本试验专门设计的水位控制器(见图 2)。该水位控制器由多个三通管连接而成,控制某一水位出流时,只需将相应高程的三通管出口打开,其余出口堵死即可。暗管出口及水位控制器用水池砌起来,水池内壁进行防渗处理,池顶安设一混凝土盖板,可以阻绝雨水的降落以及杂物进入,确保试验的精度和设施的完好。池子底部接大表和小表 2 个水表。排水量大时 2 个表全开,流量小时只开小表。水表进水口设过滤网,防止杂物进入堵住水表。地表排水口同样用水池砌起并安装 2 个水表,用于测定地表出水流量。



图 2 水位控制设施示意图

Fig. 2 Schematic map of water level control device

1.3 测定项目及方法

旱地在降雨之后产生径流的次数较少,而且试验地区大的降雨一般发生在 6—8 月,所以本试验对氮素径流流失的测定主要在 7—8 月,其他时间发生大降雨引起的氮素径流流失量可以根据观测期间的规律做出一般性推断。

本试验观测的主要有 4 次排水过程,分别是 2008 年 7 月 23 日(记为 D723)、2008 年 8 月 15 日(记为

D815 \ 2008 年 8 月 30 日(记为 D830 \ 2009 年 9 月 10 日(记为 D910 \)(日期均为主要排水发生的时间) 4 次排水过程对应的分别为 2008 年 7 月 22 日降雨(持续 7 d ,最大日降雨量 49.7 mm ,总降雨量 58.8 mm \ 2008 年 8 月 15 日降雨(持续 4 d ,最大日降雨量 113.6 mm ,总降雨量 127.4 mm \ 2008 年 8 月 29 日降雨(持续 4 d ,最大日降雨量 76.6 mm ,总降雨量 118.4 mm \ 2009 年 9 月 10 日灌水(持续 1 d ,灌水量为 90 mm)。 分别对 4 次排水过程引起的地表、地下排水量 ,排水中氮素含量以及氮素径流流失量进行测定分析。

排水量由各个排水口水表读出 ,水样硝氮质量浓度测定采用双波长比色法 ,铵氮质量浓度测定采用纳氏试剂比色法 ,全氮质量浓度测定采用碱性过硫酸钾消煮法。降雨开始后 ,密切关注各处理田块地表地下排水口出水情况 ,一般大的降雨后会较快产生排水 ,排水口出现排水时 ,记录下出水时刻 ,并读取水表的读数 ,同时取排水水样测定其硝氮、铵氮和全氮的含量 ;之后 ,每 2 ~ 3 h 读取排水口流量读数和取样 ,一直到排水口无排水为止。

2 试验结果和数据分析

2.1 雨后控制排水量分析

根据各个田块排水口水表读数 ,统计不同田块 4 次排水过程的排水量 ,结果如表 1 所示。由表 1 可知 , D723 ,D815 ,D830 ,D910 4 次排水过程中最大排水量均由 D 田块产生 ,排水总量所占降雨量的比例分别达到 65.84% 48.90% ,55.42% ,10.95% ;最小排水量均由 A 田块产生 ,占降雨量的比例为 15.27% ,8.46% ,19.16% 0。由此可知 ,对于旱作地而言 ,总排水量占降雨量或灌水量的比例是很可观的 ,平均比例最大为 30.65% (D830) ,排水量相差较大 ,控制排水和自由排水的排水量占降雨量比例之差最大可达 50%。因为降雨或灌水中的很大部分损失在田面入渗 ,当降雨强度或灌水强度大于入渗强度时 ,就会产生地表径流 ;当旱地有效土层达到田间持水量时 ,就会发生深层渗漏和地下暗管排水 ,即排水量的大小也取决于降雨或灌溉前的土壤水分状况。如 D910 此次灌水之前 ,试验站地区经历了罕见的干旱少雨情况 :1 个多月不见明显降雨 ,70 多天仅有 73.4 mm 的降雨量 ,所以 ,D910 虽然有 90 mm 的灌水量 ,但是各田块平均排水量仅为 2.53 mm(占降雨量的比例为 2.81%) ,最大排水量仅为 95.84 mm(占降雨量的比例为 10.95%) ,甚至有 2 个处理田块没有出水 ,这与其余 3 次排水有很大的差异。

表 1 各田块单位面积排水量

Table 1 Drainage discharge from plots per unit area

田块	控制水位/cm	排水类别	排水量/(m ³ ·hm ⁻²)			
			D723	D815	D830	D910
A	30	地表	26.35	35.56	107.25	0
		暗管	63.46	72.18	119.60	0
b	50	地表	43.31	57.37	125.84	2.69
		暗管	87.73	91.93	101.39	2.99
C	80	地表	46.06	72.38	105.91	0
		暗管	103.19	213.59	210.53	25.21
D	100	地表	34.03	70.74	70.36	0
		暗管	353.11	552.24	585.83	95.84
E	0	地表	128.25	167.37	388.00	0
		暗管	0	0	0	0

控制排水田块中 ,除 D830 的 A 田块和 D910 的 A 田块 ,其他田块暗管排水量均大于地表排水量。由此可知 ,暗管排水条件下 ,暗管排水是排水的主要形式。通常情况下 ,当降雨强度达到一定程度时 ,地表会很快形成径流 ,此时地表排水口可以及时排除地表积水 ,这对于旱作物来说是很必要的。但地表排水持续的时间一般较短 ,排水总量不大 ,暗管排水则持续的时间较长 ,一般有 3 ~ 7 d。

表2为不同暗管控制水位田块相对自由排水田

表 2 控制排水田块相对自由排水田块减排率

Table 2 Relative reduction rates of drainage discharge in controlled drainage plots compared with free drainage plots

排水过程	减排率/%			
	A	B	C	E
D723	76.8	66.2	61.5	66.9
D815	82.7	76.0	54.1	73.1
D830	65.4	65.4	51.8	40.9
D910	100.0	94.1	73.7	100.0

块总排水量的减少值与自由排水总排水量的比值。从表 2 可知,暗管控制水位田块的总排水量相对自由排水田块明显减少,暗管控制水位田块相对减排率不低于 40%;对 ABC 3 块暗管控制水位田块,控制水位越高(即控制地下水位埋深越浅),减排效果越明显。如 D723 从 C 田块的 61.5% 增加到 A 田块的 76.8%,D815 从 C 田块的 54.1% 增至 A 田块的 82.7%。但是,除了 D910 外,其余 3 次排水都出现 E 田块总排水量逆势增加的情况。具体分析数据发现,E 田块的地表排水量一直居高不下,这可以理解为暗管排水对地表排水的反馈作用,当暗管控制水位高到一定程度以致影响降雨的稳定入渗时,地表排水量必然相应增加。E 田块无暗管控制排水(即暗管控制水位为 0 cm),导致地下排水严重滞后,从而出现地表排水量居高不下的现象。

从表 1 可知,暗管排水量有明显的随暗管控制水位升高而减少的规律,说明暗管排水水位控制有效地控制了暗管排水量。从表 1 还可看出,暗管控制排水显著减少了暗管排水量,4 次排水中 D 田块的暗管排水量是 C 田块的 2~4 倍,是 A 田块的 5~8 倍。各处理田块的地表排水量没有表现出明显的与暗管控制水位的相关性。ABCD 田块的地表排水量都比较接近,只有 E 田块的地表排水量为其他田块排水量的 4~5 倍,其原因可能是由于 E 田块没有地下排水通道,田间积水都经过地表排出。从这一现象可以看出,暗管控制水位在地表以下 30 cm 及以下不会对地表排水量产生明显影响,而如果再抬高的话,就会严重影响降水和灌溉的入渗,阻碍水流的地下排放,从而增加地表排水压力,不仅不能减少总排水量,而且还会增加地表土壤中养分及氮素的流失。

2.2 氮素径流流失过程分析

对于氮素径流流失过程的分析,选取 D723、D815、D830 排水过程(D910 排水由于持续时间较短、取样较少,不进行过程分析)为代表来进行分析。3 次排水过程排水中硝氮、铵氮和全氮 3 个氮素水质指标测定结果见图 3 和图 4。

从图 3 可以看出:(a)3 次暗管排水铵氮质量浓度很低,基本在 1 mg/L 以下,硝氮质量浓度一般在 4 mg/L 以下,全氮质量浓度较高,但也只有 10 mg/L 左右。说明暗管排水氮素质量浓度较低。(b)各田块排水中硝氮质量浓度变化规律明显,初始时较小,逐渐增大到峰值后又逐渐减少,铵氮质量浓度变化无明显规律,全氮质量浓度变化规律与硝氮相似。(c)初步发现,A 田块暗管排水硝氮质量浓度较其他田块高,但各形态氮素质量浓度与控制排水与否及控制排水水位高低无明显关系。

从图 4 可以看出:(a)排水一般持续时间较短,各形态氮素质量浓度随时间变化较小。(b)各次排水全氮质量浓度最高,硝氮和铵氮质量浓度视雨量大小而异,但硝氮质量浓度一般不超过 4 mg/L,而铵氮质量浓度在 8 月 15 日降雨后超过 10 mg/L。

2.3 氮素径流流失量分析

2.3.1 暗管氮素径流流失

根据实测的暗管排水过程中排水流量和排水水质,得出每次排水过程中各个田块暗管氮素径流流失量,见表 3。从表 3 可以看出,铵氮的排放量均随着暗管控制水位的升高而减少,并且,通过分析发现,铵氮排放量与暗管排水量的相关性似乎更明显。对 4 次排水过程的铵氮排放量和暗管排水量进行线性回归,发现两者拟合度达到 0.944 1,分析结果见图 5。

由图 5 可见,铵氮的排放量和排水量呈正相关关系,分析原因可能为铵态氮盐容易吸附于土壤颗粒上,在水中的溶解度很小,而暗管排水中土壤悬浮颗粒较少,所以总体上来说暗管排水中铵氮含量较低且较稳定。从实测资料中可知,暗管排水量与暗管控制水位的相关性很强,控制暗管排水水位可以有效地控制暗管排水量,从而有效地控制暗管中铵氮流失量。

暗管径流硝氮和全氮排放量有随暗管控制水位升高而减少的趋势,但是,除 D910 外(长期缺水后灌溉,A 田块没有出现排水排氮),其余 3 次排水中硝氮和全氮的排放量最小的均是 B 田块,而不是控制水位最高的 A 田块,即硝氮和全氮的排放量并不是严格随控制水位升高、排水量的减少而减少。

对 D723 和 D815 进行分析后发现,硝氮和全氮的排放量在这 2 次排水过程中有明显的 B 田块低于 C 田块低于 D 田块的规律,即在这 3 个处理田块中,硝氮和全氮排放量随控制水位提高、排水量减少而减少,而 A 田块的硝氮和全氮排放量都呈现异常的增加,一般介于 C 和 D 之间(只有 D815 的全氮排放量介于 B 和 C 之间),具体原因仍有待进一步的研究。由于 D910 中 A 田块的排水、排氮量均为 0,所以无法印证上述的规律,但是 B 田块低于 C 田块低于 D 田块这一规律还是很明显的。另外,在这 3 次排水过程中,控制排水田块的



图 3 D723 ,D815 ,D830 暗管排水水质

Fig. 3 Pipe drainage water quality of D723 , D815 , and D830

硝氮和全氮排放量均显著低于自由排水田块 ,一般减少 40% ~ 60%。

与 D723 和 D815 一致 ,D830 中 A 田块硝氮和全氮排放量反常增加(介于 B 和 C 之间)。但是 ,D830 中自由排水的 D 田块的硝氮和全氮排放量显著减少 ,甚至比控制排水田块的排放量还小 ,与次小的 B 田块值较接近。对此 ,可能的原因是 2008 年 7—8 月连续有多场产生排水的暴雨出现 ,而且密度较大(7 月 4 日次降雨 62.1 mm ,7 月 23 日次降雨 58.8 mm ,8 月 15 日次降雨 127.4 mm ,8 月 29 日次降雨 118.4 mm) ,导致土壤中易溶的硝态氮、亚硝态氮等大量随入渗水流淋失到有效土层以下或者随暗管径流流失到周围环境水体中。可见 ,短期内后一次暴雨导致的暗管径流硝氮、全氮流失量必然受到前一次大量氮素流失的影响。

D723 和 D815 排水过程中 ,D 田块硝氮和全氮大量随暗管径流流失 ,而且显著大于控制排水田块 ,有效土层氮库中的硝氮和全氮含量减少 ,导致后期暴雨后硝氮和全氮的排放量降低。由表 4 可见 ,D723 中控制排水田块的硝氮和全氮排放量相对 D 田块减少 35% ~ 93% ,而 D815 中硝氮和全氮排放量的相对减少率均降低 ,为 23% ~ 84% ,所以从 D723 到 D815 ,自由排水 D 田块的硝氮和全氮排放量相对减少了。在这一趋势下 ,D830 中 D 田块的硝氮和全氮排放量出现小于暗管控制排水田块有其合理性。虽然在 D830 中出现自由



图 4 D723 ,D815 ,D830 地表排水水质

Fig. 4 Surface drainage water quality of D723 , D815 , and D830

排水田块硝氮和全氮排放量小于暗管控制排水田块的情况 ,但是暗管控制排水作为一种有效的控制排水和排氮的措施 ,减缓了土壤中氮素的径流流失量 ,总体上减少了氮素的排放 ,减轻了对周围水环境的污染。

2.3.2 地表氮素径流流失量

本试验并未直接对地表排水进行控制 ,但地下、地表排水本身是密切相关的。为了解暗管控制排水对地表水氮素流失的影响 ,对地表排水量和氮素流失量进行分析 ,见表 5。

分析表 5 可知 ,地表排水、排氮量并未表现出与暗管控制水位明显的相关性。但是可以发现 ,E 田块在 D723 和 D815 中的硝氮、铵氮和全氮排放量均明显地大于其他田块 ,而 B 田块在 3 次排水过程中铵氮排放量均是各田块中的最小值或近似最小值。在 D830 中 ,D 田块排水量、氮素流失量均显著低于控制排水田块。影响地表氮素径流流失量的主要因素有田面的地形、地貌、气候、土壤和植被情况等 ,对于地表径流流失规律的研究需要进一步研究探讨。



图 5 暗管铵氮排放量与暗管排水量相关分析

Fig. 5 Correlation between discharge of ammonia nitrogen and pipe drainage discharge

表3 暗管氮素径流流失量和排水量

Table 3 Nitrogen loss and drainage discharge from subsurface drain pipe

排水过程	硝氮流失量/(g·hm ⁻²)				铵氮流失量/(g·hm ⁻²)				全氮流失量/(g·hm ⁻²)				排水量/m ³			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
D723	218	24	56	349	9	26	31	79	811	160	271	1256	90	131	149	387
D815	143	30	91	186	16	36	53	159	308	199	411	688	108	149	286	623
D830	477	274	515	243	42	44	70	142	589	337	593	309	120	101	211	586
D910	0	3	19	86	0	2	10	28	0	23	89	223	0	3	25	96

表4 控排田块相对D(100 cm)田块水氮排放减少率

Table 4 Relative reduction rates of drainage discharge and nitrogen loss in controlled drainage plots compared with plot D

排水过程	硝氮减少率/%			铵氮减少率/%			全氮减少率/%			排水量减少率/%		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
D723	37.48	93.00	83.84	88.1	66.75	60.66	35.39	87.24	78.42	76.80	66.15	61.45
D815	23.54	83.95	50.74	89.9	77.16	66.60	55.19	71.00	40.22	82.71	76.03	54.10
D910		96.28	78.05		92.66	63.27		89.89	60.01		96.89	73.70

表5 地表排水量及氮素径流流失量

Table 5 Surface drainage discharge and nitrogen loss

排水过程	硝氮流失量/(g·hm ⁻²)					铵氮流失量/(g·hm ⁻²)				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
D723	83.66	14.80	33.38	86.10	113.94					
D815						13.00	17.24	19.60	13.00	41.88
D830	148.45	137.91	156.68	29.48	97.72	40.39	73.45	123.58	6.71	111.13
排水过程	全氮流失量/(g·hm ⁻²)					排水量/m ³				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
D723	303.17	233.74	311.84	288.45	788.55	26.35	43.31	46.06	34.03	128.25
D815	98.87	32.87	108.99	149.33	163.16	35.56	57.37	72.38	70.74	167.37
D830	220.37	224.28	234.63	44.64	325.67	107.25	125.84	105.91	70.36	388.00

3 结 论

- a. 暗管排水条件下,排水的主要形式是暗管排水,暗管总排水量有随控制水位降低而增加的趋势,控制暗管排水水位能有效地控制降雨后旱地排水量。
- b. 各田块暗管排水中硝氮质量浓度变化规律明显,初始时较小,逐渐增大到峰值后又逐渐减少,铵氮质量浓度较低且变化无明显规律,全氮质量浓度变化规律与硝氮相似,地表排水各形态氮素质量浓度随时间变化较小。
- c. 暗管铵氮排放量与暗管排水量呈明显线性相关,径流氮素流失量总体上随田块暗管控制水位升高而减少。
- d. 地表氮素径流流失量的影响因素较多,未能表现出与暗管控制水位明显的相关关系。

参考文献:

[1]李凤华,赖春苗.发展生态农业,保护海洋环境[J].环境保护,2006(10B):64-67.(LI Fenghua ,LAI Chunmiao. To improve ecological agriculture and protect the marine environmen[J]. Environmental Protection 2006(10B):64-67. (in Chinese))

[2]张福珠,熊先哲,戴同顺,等.应用¹⁵N研究土壤-植物系统中氮素淋失动态[J].环境科学,1984,5(1):21-24.(ZHANG Fuzhu ,XIONG Xianzhe ,DAI Tongshun ,et al. Research of soil nitrogen leaching dynamic in soil-plant system with application of ¹⁵N[J]. Environmental Science ,1984,5(1):21-24. (in Chinese))

[3]黄满湘,章申,唐以剑.模拟降雨条件下农田径流中氮的流失过程[J].土壤与环境,2001,10(5):6-10.(HUANG Manxiang ,ZHANG Shen ,TANG Yijian ,et al. Nitrogen losses from farm runoff under simulated rainfall conditions[J]. Soil and Environmental Sciences 2001,10(5):6-10. (in Chinese))

[4]张展羽,王超,杨洁,等.不同植被条件下红壤坡地果园氮磷流失特征分析[J].河海大学学报:自然科学版,2010,38(5):479

-483.(ZHANG Zhanyu ,WANG Chao ,YANG Jie ,et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus losses in garden of red soil slope land under different vegetation measures[J]. Journal of Hohai University :Natural Sciences 2010 ,38(5) :479-483. (in Chinese))

[5] 彭世彰 ,徐俊增 ,丁加丽 ,等. 节水灌溉与控制排水理论及其农田生态效应研究[J]. 水利学报 ,2007(增刊 1) :504-510. (PENG Shizhang ,XU Junzeng ,DING Jiali ,et al. Theory of water-saving irrigation and controlled drainage and the impact on farmland ecological environmen[J]. Journal of Hydraulic Engineering 2007(Sup1) :504-510. (in Chinese))

[6] OSMOND D L ,GILLIAM J W ,RIPARIAN R O. Buffers and controlled drainage to reduce agricultural nonpoint source pollution[R]// North Carolina Agricultural Research Service Technical Bulletin 318 ,NC. Raleigh :North Carolina State University 2002.

[7] LALONDE V ,MADRAMOOTOO C A ,TRENHOLM L ,et al. Effects of controlled drainage on nitrate concentrations in subsurface drain discharge[J]. Agric Water Manage ,1996 ,29(2) :187-199.

[8] WESSTROM I ,MESSING I ,LINNAR H ,et al. The effects of controlled drainage on subsurface outflow from level agricultural field[J]. Hydrol Process 2003 ,17(8) :1525-1538.

[9] 殷国玺 ,张展羽 ,郭相平 ,等. 减少氮流失的田间地表控制排水措施研究[J]. 水利学报 ,2006 ,37(8) :926-931.(YIN Guoxi , ZHANG Zhanyu ,GUO Xiangping ,et al. Effect of drainage controlling devices on nitrogen losses in surface runoff of farmland[J]. Journal of Hydraulic Engineering 2006 ,37(8) :926-931. (in Chinese))

[10] 刘建刚 ,罗纳 ,贾中华 ,等. 从水盐平衡的角度分析控制排水在银南灌区实施的可行性[J]. 农业工程学报 ,2005 ,21(4) :43-46.(LIU Jiangang ,LUO Wan ,JIA Zhonghua ,et al. Feasibility study of adopting controlled drainage in Yinnan irrigation district based on salt and water balance[J]. Transactions of the CSAE 2005 ,21(4) :43-46. (in Chinese))

[11] LUO Wan ,JIA Z ,FANG S ,et al. Outflow reduction and salt and nitrogen dynamics at controlled drainage in the Yinnan irrigation district ,China[J]. Agricultural Water Management 2008 ,95 :809-816.

[12] 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响的试验研究[J]. 河海大学学报 :自然科学版 ,2006 ,34(1) :21-23.(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) :21-23. (in Chinese))

[13] 袁念念 ,黄介生 ,谢华 ,等. 暗管控制排水棉田氮素流失规律试验研究[J]. 农业工程学报 ,2010 ,26(9) :8-13.(YUAN Niannian ,HUANG Jiesheng ,XIE Hua ,et al. Experimental study of nitrogen leaching pattern in the controlled pipe-drainage cotton field [J]. Transactions of the CSAE 2010 ,26(9) :8-13. (in Chinese))