

深圳公明供水调蓄工程进水塔抗震分析

费 康¹ ,张福海²

(1.扬州大学岩土工程研究所 ,江苏 扬州 225009 ;2.河海大学岩土工程研究所 ,江苏 南京 210098)

摘要 :采用三维振型分解反应谱法分析深圳公明供水调蓄工程进水塔结构的自振特性 ,研究了正常蓄水位下分别遭遇顺水流向和垂直于水流向地震时进水塔的地震加速度、动位移和动应力响应 ,并验证进水塔的抗震稳定性。验证结果表明进水塔的变形和强度满足设计要求。为提高进水塔桩基础的水平承载力 ,建议在垂直于水流方向增加 6 根桩。

关键词 :进水塔 ;振型分解反应谱法 ;抗震分析 ;公明供水调蓄工程

中图分类号 :TU352 ;TU991.34⁺2 文献标识码 :B 文章编号 :1006-7647(2009)01-0052-05

Seismic analysis of the intake tower of the Shenzhen Gongming Water Supply Project / FEI Kang¹ , ZHANG Fu-hai²
(1. Institute of Geotechnical Engineering , Yangzhou University , Yangzhou 225009 , China ; 2. Institute of Geotechnical Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract : The natural vibration characteristics of the intake tower of the Shenzhen Gongming Water Supply Project are analyzed with the three-dimensional mode-superposition response spectrum method. The earthquake acceleration , dynamic displacement and dynamic stress of the intake tower at normal water levels during an earthquake along the flow or perpendicular to the flow are examined. Seismic stability of the intake tower is verified. The results indicate that the strength and deformation of the intake tower meet the design requirements. To improve the horizontal bearing capacity of the intake tower pile foundation , it is recommended that six piles are added in the vertical direction of the flow.

Key words : intake tower ; mode-superposition response spectrum method ; seismic analysis ; Gongming Water Supply Project

深圳公明供水调蓄工程进水塔塔顶高程 77.85 m ,塔高 58.35 m ,为钢筋混凝土结构 ,孔口为方形。进水塔高程 26.1 m 以上为井筒结构 ,由侧墙和胸墙组成 ,壁厚均为 1.0 m ;高程 26.1 m 以下为闸墩 ,厚 1.65 m。进水塔底板顶面高程 21.5 m ,厚 2.0 m ,顺水流方向长 12 m ,垂直水流方向宽 11.3 m。塔基础初步设计为钻孔灌注桩基础(共 30 根) ,桩长 20 m ,桩径为 0.8 m ,顺水流方向桩间距为 2.080 m ,共 6 列 ,垂直水流方向桩间距为 2.425 m ,共 5 排。单桩竖向承载力设计值为 2 814 kN ,水平承载力设计值为 200 kN。

该进水塔场地设计地震烈度为 7° ,由于进水塔的塔高大于 40 m ,按《水工建筑物抗震设计规范》^[1]的要求 ,该进水塔的抗震计算应采用动力法 ,考虑到塔内外水体及地基的影响 ,宜采用振型分解反应谱法。本文利用三维有限元程序 ABAQUS 对进水塔的地震加速度、动位移和动应力响应进行分析 ,在此基础上对其抗震稳定性进行评价 ,并提出设计修改意见。

1 计算理论

在地震荷载作用下 ,结构-库水-地基系统的动力方程为^[2]

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -Ma_g \tag{1}$$

式中 : M 为系统的质量矩阵 ; C 为系统的阻尼矩阵 ; K 为系统的刚度矩阵 ; a_g 为地面加速度列阵 ; $\ddot{u}$, $\dot{u}$, u 分别为节点的位移、速度和加速度列阵。

式(1)的求解采用振型分解反应谱法 ,即首先由振型分解法对进水塔进行自振特性分析 ,求出进水塔的自振频率和振型 ,然后由各振型的正交性将进水塔结构的耦合运动方程进行解耦 ,分解为独立的方程求解 ,求出各振型的最大响应值后 ,用平方和方根法求解结构的最大响应值。

计算进水塔地震作用效应时 ,塔内外的动水压力可分别以塔内外表面的附加质量考虑。塔内外附加质量参照《水工建筑物抗震设计规范》^[1]确定。

作者简介 :费康(1978—) ,男 ,江苏如皋人 ,讲师 ,博士 ,从事岩土地震工程及岩土数值分析研究。E-mail :fei@hhu.edu.cn

2 计算模型与基本资料

2.1 有限元几何模型

进水塔和地基的相互作用对塔体的自振特性和地震反应有不可忽略的影响,分析中应予以考虑^[3-4]。考虑到进水塔引起的应力影响范围和保证对结构有影响的振动频率分量能量的通过,计算中地基的范围向塔体的外侧及向下分别延伸了 20 m。分析区域采用四面体单元进行离散,共计剖分 31 190 个单元 20 172 个节点。每根单桩都单独划分了实体单元,启闭机、电动葫芦等设备的质量和动水压力通过单节点质量单元来反映。计算中地基采用工程中广泛应用的无质量地基模型,即忽略地基质量而只考虑其刚度对结构动力反应的影响,这样就消除了地基对地震运动的放大作用^[5]。桩的质量同样不予考虑。有限元网格剖分见图 1,其中 x 轴指向上游(与水流方向相反), y 轴垂直于水流方向, z 轴竖直向上。

需要指出,若要较好地模拟桩-土的动力相互作用,有限元分析中需在桩土界面上设置接触面单元,并考虑接触面的非线性特性。考虑到本次分析的重点是进水塔结构的地震响应,因此分析中仅将桩土界面临近区域的网格适当加密,以反映应力变化的高梯度性。

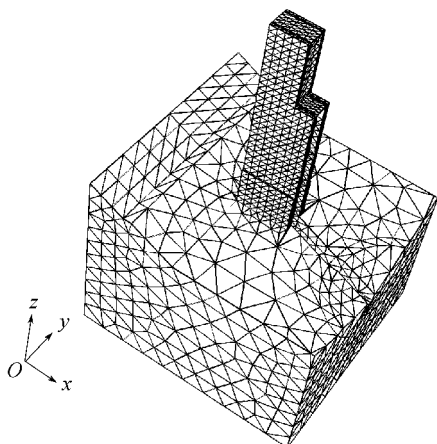


图 1 有限元网格

2.2 材料参数及设计反应谱

进水塔塔体混凝土强度等级采用 C30,抗压强度设计值为 15.0 MPa,抗拉强度为 1.5 MPa,弹性模量为 30 GPa,密度为 2 500 kg/m³,泊松比为 0.18。动力分析时动弹性模量比静弹性模量提高 30%。根据地基土的剪切波速资料,地基土的动弹性模量估计为 300 MPa,泊松比为 0.30,密度为 1.83 g/cm³。

根据地震危险性分析成果,场地设计地震烈度为 7°,地震影响系数设计反应谱见式(2)。

$$\alpha(T) = \begin{cases} \alpha_{\max}(0.45 + 5.5T) & 0 \leq T < T_0 \\ \alpha_{\max} & T_0 \leq T < T_g \\ \alpha_{\max}(T_g/T)^\eta & T_g \leq T < 5T_g \\ \alpha_{\max}[0.2^\eta - 0.02(T - 5T_g)] & 5T_g \leq T < 6 \end{cases} \quad (2)$$

式中: α 为地震影响系数; $\alpha_{\max}$ 为地震影响系数上限值; T 为周期; T_g 为特征周期; η 为系数。

根据地震危险性评价,抗震设计水平采用 50 年超越概率 5% 的情况,即式(2)中的 $\alpha_{\max} = 0.2666$, $T_g = 0.65$ s, $\eta = 1.0$ 。计算中考虑了进水塔在正常蓄水位下分别遭遇顺水流方向和垂直于水流方向地震的情况。

3 计算结果与分析

3.1 进水塔塔体自振特性及动位移

由于动水压力的附加质量具有方向性,顺水流方向地震作用和垂直于水流方向的地震作用下塔体自振特性略有不同。进水塔的前 5 阶自振频率计算结果见表 1。分析计算结果可以得出,由于塔体垂直于水流方向的尺寸小于顺水流方向的尺寸,垂直于水流方向的刚度较小且动水压力对进水塔的影响较大,相应的自振周期也较长。

表 1 进水塔塔体自振特性参数

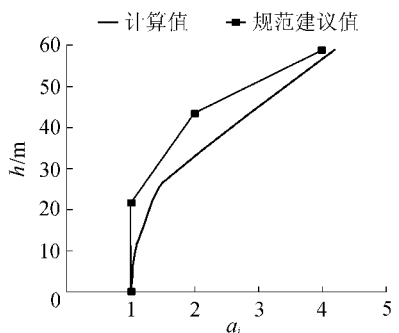
阶数	顺水流方向的地震		垂直于水流方向的地震	
	自振频率/Hz	自振周期/s	自振频率/Hz	自振周期/s
1	1.78	0.562	1.62	0.617
2	2.16	0.463	1.95	0.513
3	6.06	0.165	5.82	0.172
4	6.99	0.143	6.09	0.164
5	9.12	0.110	8.11	0.123

地震动位移最大值均发生在塔顶。在顺水流向的地震作用下,顺水流方向的动位移为 22.81 mm,由于进水塔在垂直于水流方向左右对称,垂直于水流方向的动位移较小,为 0.12 mm。而在垂直于水流向的地震作用下,顺水流和垂直于水流 2 个方向的动位移分别为 0.23 mm 和 35.59 mm,垂直于水流方向的地震响应要大一些,这和自振特性的分析结果是一致的。

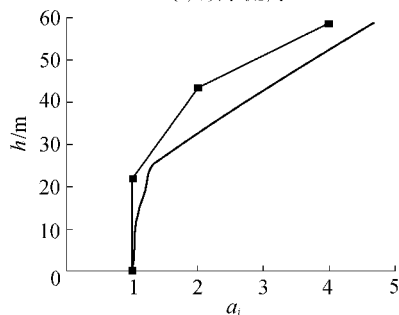
3.2 加速度沿塔高的分布

在顺水流和垂直于水流向的地震作用下加速度动态分布系数 a_i 沿塔高 h 的分布见图 2,拟静力法分析时规范建议值也同时绘制于图 2 中。图 2 中的高度 0 m 表示进水塔塔底,高度 58.35 m 表示启闭层顶部。

由图 2 可见,计算得到的放大系数(即分布系数中的最大值)与规范设计建议值有差别。塔体上部顺水流方向加速度放大系数为 2.77,垂直于水流方



(a) 顺水流向



(b) 垂直于水流向

图2 地震加速度分布系数沿塔高的分布

向放大系数为 2.95 ;启闭层顶部顺水流方向放大系数为 4.19 ,垂直于水流方向放大系数为 4.69 ,均略大于拟静力法分析的规范建议值 ,且垂直于水流方向的放大系数要大于顺水流方向的放大系数 ,这表明塔体垂直于水流方向的地震响应要大一些。

3.3 地震对塔体应力的影响

3.3.1 静应力

进水塔在完建期和正常蓄水位下的静应力计算结果见表 2。表中应力为负表示压应力 ,应力为正表示拉应力。由计算结果可见 :

a. 塔体结构主要受压应力作用。完建期和正

表2 进水塔静应力计算结果

完建期			正常蓄水位工况		
应力 / MPa	位置	高程 / m	应力 / MPa	位置	高程 / m
$\sigma_x = 0.247$	侧墙边缘	32.5	$\sigma_x = 0.195$	闸墩内侧下的底部处	19.5
$\sigma_x = -0.372$	闸墩下的底板底部	19.5	$\sigma_x = -0.771$	闸门门槽	24.5
$\sigma_y = 0.831$	加固梁中部	33.5	$\sigma_y = 0.546$	闸墩外边缘下的底板底部	19.5
$\sigma_y = -1.312$	加固梁中部	25.5	$\sigma_y = -1.102$	加固梁中部	25.5
$\sigma_z = 0.077$	塔顶底板中心	77.6	$\sigma_z = 0.078$	塔顶底板中心偏 x 轴负向	77.6
$\sigma_z = -2.597$	上游闸墩底部两侧	24.0	$\sigma_z = -2.040$	上游闸墩底部两侧	24.0
$\sigma_1 = 0.842$	加固梁	33.5	$\sigma_1 = 0.598$	闸墩外边缘下的底板底部	19.5
$\sigma_1 = -0.251$	闸墩下的底板底部	19.5	$\sigma_1 = -0.312$	闸墩下的底板底部	19.5
$\sigma_3 = 0.007$	塔顶底板中心偏 y 轴正向	77.6	$\sigma_3 = 0.007$	塔顶底板中心偏 y 轴负向	77.6
$\sigma_3 = -2.643$	上游闸墩底部两侧	24.0	$\sigma_3 = -2.331$	上游闸墩底部两侧	24.0

常蓄水位下最大的主拉应力分别为 0.842 MPa 和 0.598 MPa ,最大的主压应力分别为 - 2.643 MPa 和 - 2.331 MPa。主压应力约是主拉应力的 3 ~ 4 倍。主压应力最大的部位在闸墩底部 ,其大小远小于混凝土抗压强度设计值。

b. 塔体结构的竖向应力 σ_z 以压应力为主 ,完建期和正常蓄水位下的最大值都发生在进水口附近的闸墩下部 ,分别为 - 2.597 MPa 和 - 2.040 MPa ,塔顶的竖向应力最小。

c. 塔体结构的水平应力 σ_x (顺水流方向) 和 σ_y (垂直水流方向) 与 σ_z 相比要小得多 ,大致约为竖向应力的 10% ~ 30%。计算表明水平向的最大主拉应力出现在 y 方向 ,即 σ_y 完建期时为 0.831 MPa ,发生在高程 33.5 m 的加固梁中部。值得注意的是 ,由于两侧闸墩传来上部结构的竖向自重及弯矩 ,造成在闸墩底板底面相应位置的水平向拉应力也较大 ,完建期的最大值约为 0.586 MPa ,正常蓄水位时最大约为 0.598 MPa。

3.3.2 动应力

在顺水流向地震和垂直于水流向地震作用下的最大动应力计算结果见表 3。图 3 和图 4 分别给出了顺水流和垂直于水流向地震作用下竖向动应力的等值线分布。计算结果表明 :

a. 竖向动应力明显大于水平动应力 ,最大水平动应力约为最大竖向动应力的 30%。

b. 垂直于水流向地震作用下的应力值高于顺水流向地震作用下的应力值。这是因为进水塔塔体垂直于水流方向的刚度较小 ,而动水压力影响较大所造成的。以竖向动应力为例 ,垂直于水流向地震作用下竖向最大动应力为 3.779 MPa ,而顺水流向地震作用时竖向最大动应力仅为 2.190 MPa。

c. 整个动应力的分布呈现出上下游大、侧墙中央小的规律。这是因为在顺水流向地震作用下 ,塔体主要变形模式是弯曲变形 ,即塔体沿着 x 轴来回摆动 ,侧墙两侧受到的拉压作用最明显。而在垂直于水流向地震作用下 ,塔体主要沿着 y 轴来回摆动 ,因而这时侧墙某一高度上的动应力基本呈均匀分布(图 3(a)) ,而从 y-z 平面上的结构来看(图 4(b)) ,

表3 进水塔动应力计算结果

顺水流向地震			垂直于水流向地震		
应力 / MPa	位置	高程 / m	应力 / MPa	位置	高程 / m
$\sigma_x = 0.697$	左右侧墙边缘	32.5	$\sigma_x = 0.999$	胸墙中部	39.0
$\sigma_y = 0.567$	闸墩下底板底面	19.5	$\sigma_y = 1.095$	闸墩下底板底面边缘	19.5
$\sigma_z = 2.190$	侧墙上下游下部边缘	31.9	$\sigma_z = 3.779$	侧墙上下游两侧边缘	32.5

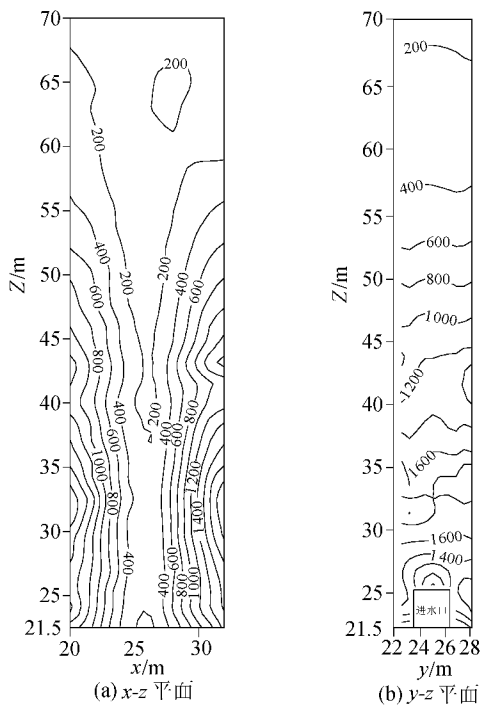


图3 正常蓄水位+顺水流向地震塔体 z 向动应力(单位:kPa)

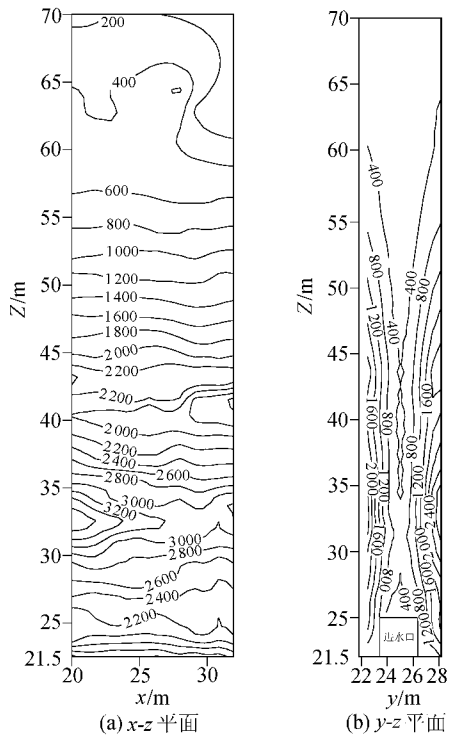


图4 正常蓄水位+垂直于水流向地震塔体 z 向动应力(单位:kPa)

塔体 x 轴线附近位置的动应力最小,小于400 kPa;最大值出现在回填高程32.5 m处的下游侧墙边缘。

d. 底板的动应力以 y 向为主,垂直于水流向地震作用下的 σ_y 最大为1.095 MPa,顺水流向地震作用下的 σ_y 最大值为0.364 MPa,位置基本都出现在右侧闸墩位置外侧下的底板外边缘;垂直于水流向地震作用下的 σ_x 最大值为0.283 MPa,顺水流向地

震作用时的 σ_x 最大值为0.298 MPa,出现在底板底面上游右岸一侧。

3.3.3 静动应力叠加及配筋验算

振型分解反应谱法计算得到的动应力是交变应力,包括所有可能出现的不利应力状态。按《水工建筑物抗震设计规范》^[1]要求进行钢筋混凝土结构进水塔的截面承载力抗震验算时,应对用动力法计算的地震作用效应进行折减,地震作用效应系数取0.35。根据静动应力叠加结果,对地震引起的动应力较大的关键部位进行了配筋验算,结果见表4。由表4可见,配筋是满足要求的。

表4 关键部位配筋量

位置	动静叠加最大拉应力/MPa	按拉应力计算配筋面积/mm ²	实际配筋面积/mm ²
闸墩下部(竖向)	0.518	3418	3927
侧墙(竖向)	0.456	3012	3927
胸墙(水平)	0.573	2292	3041
底板(横向)	0.929	4087	4926

注:侧墙和胸墙高程范围均为26.1~41.5 m。

3.4 桩基承载力验算

3.4.1 桩基竖向承载力

桩受到的竖向及水平向的荷载是根据有限元计算中得到的桩顶平均应力乘以桩顶面积得到的。在地震过程中,各单桩都受到循环的拉压作用,因而本文给出的地震过程中可能出现的最大荷载的数值是将动力计算结果乘以地震效应折减系数(0.35)后与静力计算结果叠加而得。

计算结果表明,在完建期,桩顶最大竖向荷载为2479 kN,出现在上游左侧的角桩;正常蓄水位下,桩顶最大竖向荷载为1499 kN,出现在下游右侧的角桩;正常蓄水位+顺水流向地震和正常蓄水位+垂直于水流向地震工况下的桩顶竖向荷载最大值分别为2329 kN和2464 kN,都出现在下游右侧的角桩。

综上所述,完建期工况为桩顶竖向荷载的设计控制工况,荷载大小为2479 kN,而单桩竖向承载力设计值是2814 kN。因此桩基竖向承载力设计满足要求。

3.4.2 桩基水平承载力

计算结果表明,在完建期,外桩(桩基础周边的桩)承受的水平荷载较大,内桩承受的水平荷载较小,桩顶最大水平荷载为228 kN,出现在下游右侧的角桩;正常蓄水位下的桩顶水平荷载同样有外桩较大、内桩较小的分布规律,桩顶最大水平荷载为92 kN,出现在上游左侧的角桩。

正常蓄水位+顺水流向地震工况下桩顶水平荷载最大值为251 kN,正常蓄水位+垂直于水流向地

震工况下桩顶水平荷载最大值为168 kN。

由以上结果可知 ,完建期工况单桩水平荷载为 228 kN ,大于单桩水平承载力设计值 200 kN ;地震工况下的单桩水平荷载最大值为 251 kN ,略大于250 kN (地震工况单桩水平承载力设计值放大 1.25 倍) ,均不满足要求。为设计安全起见 ,建议在垂直于水流方向加 1 排桩 ,即由 30 根(6 列 × 5 排)调整为 36 根(6 列 × 6 排)桩。同时 ,该方向的桩距由 2.425 m 调整到 2.0 m ,承台(底板)宽度从 11.3 m 调整到 11.6 m ,即底板两侧各外扩 0.15 m ,调整较小。调整后完建期及地震工况下的单桩水平荷载最大值分别为 176 kN 和 219 kN ,均满足要求。

4 结 论

a. 深圳公明供水调蓄工程进水塔垂直于水流方向的地震响应要大于顺水流方向的地震响应。在顺水流方向地震及垂直于水流方向地震分别作用下 ,进水塔的最大动位移分别为 22.81 mm 和 35.59 mm ,均发生在塔顶 ,塔体的相应加速度放大系数分别为 2.77 和 2.95 ,启闭层顶的加速度放大系数分别为 4.19 和 4.69。

b. 无地震作用时塔体结构主要受压应力作用 ,主压应力最大的部位在闸墩底部。其大小远小于混凝土抗压强度设计值。地震作用影响的塔体结构竖向动应力明显大于水平动应力。垂直水流向地震作

用下的应力大于顺水流向地震作用下的应力。

c. 按三维有限元计算的最大拉应力配筋的钢筋面积均小于设计实配值 ,实配钢筋是满足要求的。

d. 有限元计算获得的最大桩顶竖向荷载为 2479 kN ,小于单桩竖向承载力设计值 ,桩基的竖向承载力满足要求。

e. 计算得到的完建期时桩顶最大水平荷载为 228 kN ,地震工况下的桩顶最大水平荷载为 251 kN ,均略大于设计时采用的单桩水平承载力设计值 ,建议在垂直于水流的方向加 1 排(6 根)桩 ,从而确保进水塔安全。

参考文献 :

[1] SL—203—97 水工建筑物抗震设计规范[S]。
[2] 殷宗泽.土工原理[M]。北京 :中国水利水电出版社 , 2007。
[3] 张柏成 ,李同春.百色水电站进水塔抗震分析[J]。水利水电科技进展 ,2004 ,24(1) :29-31。
[4] 胡良明 ,李宗坤 ,王广印 ,等.地震作用对小浪底水利枢纽 2 号进水塔底影响分析[J]。人民黄河 ,2001 ,23(5) :38-39。
[5] 何发祥 ,王忠 ,刘浩吾.采用无质量地基模型时动力平衡方程的缩减[J]。四川大学学报 :工程科学版 ,2000 ,32(4) :7-10。

(收稿日期 2008-04-25 编辑 :方宇彤)

(上接第 43 页)

[5] SKAGGS R W ,CHESCHEIR G M. Effects of subsurface drain depth on nitrogen losses from drained land[J]。Transactions of the ASAE ,2003 ,46(2) :237-244。
[6] 刘建刚 ,罗 纨 ,贾忠华 ,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。
[7] 刘建刚.宁夏银南灌区采用控制排水后水盐平衡分析研究[D]。西安 :西安理工大学 ,2005。
[8] 杨丽丽 ,刘建刚 ,刘 昕 ,等.银南灌区控制排水后水盐平衡分析[J]。人民黄河 ,2006 ,28(7) :40-44。
[9] 尹娟 ,费良军 ,勉韶平.宁夏银南灌区稻田控制排水条件下氮素淋失的研究[J]。西北农林科技大学学报 :自然科学版 ,2006 ,34(1) :108-112。
[10] 殷国玺 ,张展羽 ,邵光成.农田地表控制排水对排水水中磷质量浓度的影响[J]。水利水电科技进展 ,2006 ,26(4) :24-26 ,39。
[11] AYARS J E ,GRISMER M E ,GUITJENS J C. Water quality as design criterion in drainage water management systems[J]。Journal of Irrigation and Drainage Engineering ,ASCE ,1997 , 123(3) :154-158。

[12] EVANS R O ,GILLIAM J W ,SKAGGS R W ,et al. Effects of agricultural water table management on drainage water quality [EB/OL]。[1989-03-01]。http ://www.ncsu.edu/ncsu/wrri/reports/report237.html。
[13] GILLIAM J W ,SKAGGS R W ,WEED S B. An evaluation of the potential for using drainage control to reduce nitrate loss from agricultural fields to surface waters[R]。Raleigh :North Carolina Water Resources Research Institute ,1978。
[14] GILLIAM J W ,SKAGGS R W ,WEED S B. Drainage control to reduce nitrate loss from agricultural fields[J]。Journal of Environmental Quality ,1979 ,8(1) :137-142。

(收稿日期 2008-06-25 编辑 :方宇彤)

