

南水北调东线工程淮河流域段农业面源污染负荷估算

唐莉华, 张思聪, 吕贤弼, 刘铭环

(清华大学水利系, 国家水沙科学重点实验室, 北京 100084)

摘要: 南水北调是解决我国北方地区水资源短缺的一项重大调水工程, 其中, 水环境质量问题为南水北调东线工程的最大隐患。农业面源污染作为南水北调沿线的主要污染源之一, 对其进行综合防治, 是沿线生态环境和水质安全的重要保证, 也是保证南水北调工程成功的关键因素。采用污染负荷估算法, 对南水北调东线工程淮河流域段的农业面源污染负荷进行了估算, 并分析了其时空分布特征。结果表明, 淮河流域内南水北调东线工程沿线的入河农业面源污染年负荷分别为: BOD_5 约 $3.6 \text{ 万 t} \cdot \text{a}^{-1}$, COD 约 $9.0 \text{ 万 t} \cdot \text{a}^{-1}$, TN 约 $1.4 \text{ 万 t} \cdot \text{a}^{-1}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ 约 $0.14 \text{ 万 t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。其中汛期负荷量占年总量的 70% 左右; 湖东区单位面积面源负荷量比湖西区的相对较大, 主要与地形地势等因素有关。研究结果可为沿南水北调东线工程淮河流域段的水环境保护措施和污染控制规划提供科学依据。

关键词: 农业面源污染; 负荷计算; 南水北调东线; 淮河流域

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 1672-2043(2008)04-1437-05

Estimation of Agricultural Nonpoint Source Pollution Loads of the Huai River Basin in the East Line of South-to-North Water Diversion Project

TANG Li-hua, ZHANG Si-cong, LU Xian-bi, LIU Ming-huan

(Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Beijing 100084, China)

Abstract: The South-to-North Water Diversion project in China is of great strategic significance to solve the problem of water shortage in the north of China. However water quality is one of the key issues of this water diversion project, especially for the East Line Project because of its existed heavy pollution pressure. The study area located in Huai River basin along the East Line Project is an important agricultural area in China, and many researches proved that agricultural nonpoint source pollution had become main threat for surface water bodies in this area. Therefore the synthetical control measures of agricultural nonpoint source pollution in the research area is crucial for ensuring the success of water diversion project, as well as the eco-environmental sustainable development and water safety. In this paper, an estimation method was adopted to calculate the pollution loads, including total nitrogen(TN), ammonia nitrogen($\text{NH}_4\text{-N}$), and biologic oxygen demand(BOD_5) and chemical oxygen demand (COD). The temporal and spatial distributions of non-point source pollution in the study area were also analyzed. The calculated results of agricultural nonpoint source pollution loads are about 360 BOD_5 , 90 COD, 14 TN and 1.4 $\text{NH}_4\text{-N}$ thousand ton per year respectively. In general, the pollutant loads discharged in flood season account for about 70% of the total amount, because heavy non-point source pollution often occur in heavy storms. Spatially, the loads per unit area discharged from the east area of Nansi lake are larger than that from the west, mainly owing to the steeper topology and the consequent larger water and soil loss in the east area. Hereby, the water and soil conservation in mountainous area is much more important to mitigate agricultural nonpoint source pollution. These research results can provide useful basis for pollution control in the study area.

Keywords: agricultural nonpoint source pollution; pollution loads; east line of South-to-North Water Diversion project; Huai River basin

南水北调是为解决我国北方地区水资源严重短缺问题的一项具有重大战略意义的调水工程。为发挥南水北调工程预期的经济、社会和生态效益, 国家水

利部、环境保护部等部门联合行动, 通过关停淘汰排污严重的企业、污水达标排放控制、建污水处理厂等方式, 力争减少污染负荷排入河, 保证南水北调的水质。这些措施对控制点源污染具有一定效果。随着点源污染治理水平的不断提高, 面源污染将成为流域重要污染源。

南水北调东线工程干线经江苏、河南、安徽、山

收稿日期: 2008-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(50709016); 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室开放基金(Sklhse-2006-A-02)

作者简介: 唐莉华(1975—), 女, 硕士, 讲师, 从事水文水资源及水环境研究。E-mail: tanglh@tsinghua.edu.cn

东、河北等主要的农牧渔业生产省份。农药、化肥、农用地膜等生产量、使用量逐年加大,畜禽粪便废弃物量急剧上升,农业面源污染的威胁很大^[1,2]。东线调水工程的关键是水质问题,目前输水干线 50% 的监测断面水质超 V 类水质标准,水污染治理的任务十分艰巨。2004 年山东省淮河流域农业面源污染严重,流域内化肥、农药施用量高出全国平均水平 30% 左右,约 70% 的化肥、农药都流失或残存在农产品和土壤中^①;区域畜禽养殖粪便总量每年 1 亿 t 左右,约有 40% 直接排入环境;东线工程沿线地表水环境主要超标因子为有机物和氨氮^[1,3],可见面源污染不容忽视。

根据《南水北调东线工程治污规划》,东线工程输水干线规划区包括淮河流域、黄河流域及海河流域共 47 个控制单元,其中淮河流域内有 33 个,占控制单元总数的 70%。一期工程 90% 的输水河道利用现有河道,且水环境问题突出,调水水质的好坏直接影响水资源的使用价值和沿线地区社会经济的发展,也决定着调水工程的实际效益^[4],因此该区域的水质是保障东线工程成功的关键之一^②。淮河流域骆马湖、南四湖和东平湖作为重要的调蓄水库,是南水北调东线治污规划一期工程的重点,加大治污力度,确保输水水质要求,遏制水质富营养化继续发展,是减少输水干线水质污染风险的重要举措。因此,以南水北调东线工程淮河流域段为研究区域,采用污染负荷估算法,对总氮(TN)、氨氮(NH₄⁺-N)、五日生物化学需氧量(BOD₅)和化学需氧量(COD)等主要面源污染负荷进行了估算,并根据淮河流域特征分析其时空分布规律,为南水北调东线工程的水污染控制和防治治理工作提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于南水北调东线工程的淮河流域段,面积约 4.0 万 km²,涉及南四湖和骆马湖等主要的调蓄水库及其周边沿线区域,大部分区域位于山东省境内,也包括江苏省境内的一小部分(图 1)。属暖温带大陆性冬夏季风气候,平均气温 13~14℃,全年平均降水量约 700 mm,汛期降水占年降水量的 60%~70% 左右。研究区河流众多,以南四湖为界,湖东河道干流短,坡度大,水流急;湖西地势平缓,河道坡度小,水流缓慢。区域内人口稠密,工农业都比较发达,是我国重要的农牧渔业生产区域。

区域内土地利用以农业耕地为主(图 2),农业面源污染负荷较大,且排入主干渠的污染物量较多。大部分河段属于水质敏感区,氨氮、COD 等多项指标超标。洸府河、不牢河、大汶河、房亭河、东鱼河、洙赵新河、大运河淮阴段、城郭河、卫运河山东段、泗河、东平湖等 11 个控制单元 COD 排放量为 29 万 t,占输水干线规划区排污总量的 62%,是输水干线规划区污染控制重点区^[5]。

2 面源污染负荷计算方法

暴雨径流所携带的面源污染物质以吸附于泥沙颗粒和溶解于水体中两种形式进入地表水域,因此面源污染负荷量等于固相负荷量(吸附于泥沙颗粒)和液相负荷量(溶解于水)之和。采用污染负荷估算法,对总氮的固相、液相负荷量,氨氮负荷量及 BOD₅ 和 COD 分别进行了计算。根据计算需要,将计算区划分为 32 个计算单元,雨量数据来自区域内的 10 个雨量站点,见图 3。其中以南四湖为界的湖东区和湖西区,面积分别为 16 947 km² 和 23 511 km²。

2.1 TN 面源污染负荷计算

暴雨径流所携带的面源污染物 TN 负荷等于固相负荷(吸附于泥沙颗粒)和液相负荷(溶解于水)之和,估算流程如图 4 所示,计算公式如式(1):

$$W = W_s + W_c \quad (1)$$

式中: W 为面源污染年负荷量, $t \cdot a^{-1}$; W_s 为固相年负荷量, $t \cdot a^{-1}$; W_c 为液相年负荷量, $t \cdot a^{-1}$ 。

(1) TN 固相负荷计算

吸附于泥沙颗粒的总氮固相负荷量,与输沙量(以输沙模数表示)以及土壤的养分含量有关,总氮固相负荷量为各个计算单元固相负荷量之和,可按式估计:

$$W_s = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n [M_s(i)A(i)S(i)ER(i)] \quad (2)$$

式中: $M_s(i)$ 为流域内第 i 单元年均输沙模数, $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$; $A(i)$ 为流域内第 i 单元面积, km^2 ; $S(i)$ 为流域内第 i 单元土壤养分 N 含量, %; $ER(i)$ 为流域内第 i 单元 N 富集比; n 为子流域内的单元总数。

(2) TN 液相负荷计算

被暴雨径流所溶解而输移的营养物质主要来自农田施肥,参照美国农业地区面源污染模型 AGNPS 的算法,研究区的总氮液相负荷总量 W_c 按下式估计:

$$W_c = \frac{1}{1\,000} \sum_{i=1}^n R_a(i)R_l(i)R_r(i)F(i)A(i)D(i) \quad (3)$$

①山东省人大报告(2004)

②南水北调东线工程治污规划(2001)

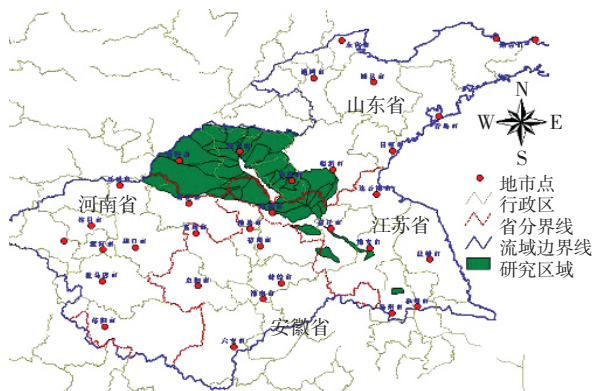


图 1 研究区位置

Figure 1 Location of the study area

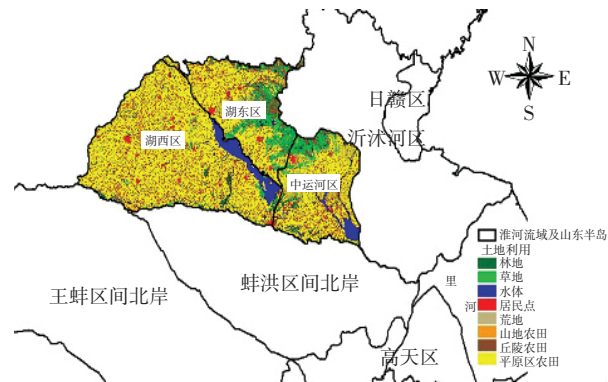


图 2 研究区土地利用图

Figure 2 Land use distribution in the study area

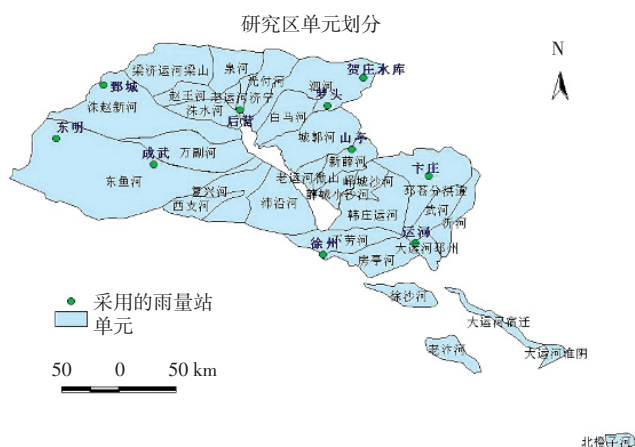


图 3 研究区单元划分及雨量站分布

Figure 3 Location of the control units and rain gauges of the study area

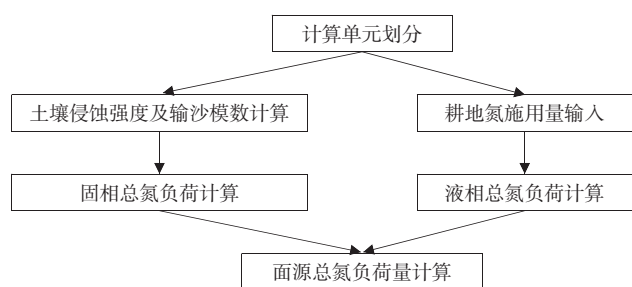


图 4 总氮面源污染负荷估算流程图

Figure 4 Flow chart of estimation of total nitrogen load

式中: W_c 为研究区总氮液相负荷总量, $t \cdot a^{-1}$ 。 $R_a(i)$ 为研究区内第 i 单元肥料有效系数, 指暴雨时, 单位面积肥料剩余量与单位面积全年施肥量之比。 $R_l(i)$ 为研究区内第 i 单元肥料经雨水淋溶下渗损失后的剩余率; $R_r(i)$ 为研究区内第 i 单元肥料随地表径流输移的比率; $F(i)$ 为研究区内第 i 单元每 km^2 全年施肥量,

$kg \cdot km^{-2}$; $A(i)$ 为单元面积, km^2 ; $D(i)$ 为折减系数; n 为单元总数。

2.2 NH_4^+-N 面源污染负荷计算

土壤中的 TN 可分为有机氮和无机氮, 其中有机氮占绝大部分, 表层中的有机氮占总氮的 90% 左右^[6]。土壤中的无机氮包括氨氮和硝酸盐, 一般以氨氮为主。淮河主要超标污染物是氨氮, 因此按照氨氮占总氮的 10% 比例估计。

入河 NH_4^+-N 负荷量的计算公式为:

$$(NH_4^+-N)_{in} = R_{NH} (TN)_{in} \quad (4)$$

式中: $(NH_4^+-N)_{in}$ 为子流域入河 NH_4^+-N 面源污染负荷, kg 或 t ; R_{NH} 为 TN 中 NH_4^+-N 所占的比例, 按 0.1 计; $(TN)_{in}$ 为固相 TN 入河量, kg 或 t 。

2.3 BOD₅ 和 COD 的计算

2.3.1 入河 BOD₅ 负荷估算公式

BOD₅ 面源污染负荷估算的基本思路: 伴随降雨产汇流所发生的产输沙, 将地表土壤中的总有机碳带入水体, 总有机碳降解生成二氧化碳 (CO_2), 则可根据 CO_2 中碳氧比例 ($C:O=1:2.667$) 来估算 BOD (其中 5 日生化需氧量 BOD₅ 占总 BOD 的比例为 0.7 左右)。易降解的部分大约占总有机碳的 5%~15%, 其余部分则难于降解, 因此入河 BOD₅ 面源负荷估算公式如下:

$$BOD_5 = 0.7 \times (2.667 \cdot orgC) \cdot R \quad (6)$$

$$orgC = S_{sed} \cdot S_{orgC} \cdot ER \quad (7)$$

式中: BOD₅ 为面源五日生化需氧量, kg 或 t ; $orgC$ 为有机碳面源负荷量, 以 C 计, kg 或 t ; R 为有机碳降解比例, 土壤中有有机碳大约有 5%~15% 是易矿化的; S_{sed} 为由于土壤流失而进入河道的泥沙量, kg 或 t , 通过输沙模数计算; S_{orgC} 为土壤中有有机碳的含量 (质量比); ER 为有机碳的富集比。

2.3.2 COD 负荷计算

COD 是水质监测中常用的有机污染的综合指标,包括了生化需氧量 BOD 和难以被微生物降解的有机物需氧量,因此 COD 的值通常大于 BOD 的值。在水质相对稳定条件下,COD 与 BOD 之间有一定关系,计算采用如下公式:

$$\text{COD}=K \cdot \text{BOD}_5 \tag{8}$$

式中:K 为 COD 和 BOD₅ 的比例系数,一般取值 2~3,计算中取 K 值等于 2.5。

3 计算结果及分析

采用 ArcGIS 软件对大量的地形、土地利用、土壤养分、输沙率分布等空间数据进行分析 and 处理。多年平均降雨条件下(降雨量为 723.3 mm)的面源污染负荷计算结果见表 1,详细分布见图 5。

湖东区的面积虽然比湖西区小,而污染负荷量却大于湖西区。研究区 BOD₅ 入河面源污染负荷总量约 3.61 万 t,其中湖东区的 BOD₅ 入河负荷量占总量的 54.7%;湖西区的 BOD₅ 入河负荷占总量的 45.3%;

COD 入河负荷量具有同样的分布比例。氨氮入河面源污染负荷总量为 0.14 万 t,其中湖东区约占总量的 66.7%,湖西区的占总量的 33.3%;TN 入河负荷量具有与氨氮同样分布比例。

表 1 列出了单位面积入河负荷量,可见湖东地区的面源污染比湖西地区严重。鲁孟胜等对南四湖流域(面积约 3 万 km²)的入湖面源污染负荷进行了调查^[7],其规律与本文大体一致,其中入湖 TN 负荷为 1.28 万 t,单位面积的 TN 入湖负荷量湖东区为 0.55 t·km⁻²,湖西区为 0.36 t·km⁻²。湖东区面源污染比湖西区严重的原因在于东部山区地势较陡,水土流失比较严重。而西边平原区地势平缓,农田中的水分和污染物以垂向运移为主,对地下水污染较大,而对地表水污染的贡献则相对较小。由于农业面源污染通常随着降雨径流和水土流失产生,因此防止山区的水土流失,对农业面源污染控制具有更加重要的意义。

面源污染产生的直接动力主要是降雨径流。研究组曾利用分布式水文模型 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)在淮河的竹竿河流域进行了降雨径流与污染负荷量之间关系的研究。结果表明,以月作为统计时段,面源污染负荷量与降雨量在时间分配上大体是同步的^[8]。为此,根据研究区内 10 个雨量站 1978—2000 年的多年月平均降雨量资料,计算研究区的平均月降雨量,并将年污染负荷总量按照降雨量的比例逐月分配,得到各个月份的面源污染负荷量(表 2 和图 6)。可见,研究区在汛期(6 月—9 月)的污染负荷比例很大,占全年总量的 70%左右。从这个意义上讲,采用科学合理的农业施肥时间和方式,提高肥料的利用效率,从源头上有效控制汛期面源污染负

表 1 面源污染负荷计算结果(万 t)

Table 1 Nonpoint source pollution load of the study area(10⁴ t)

区域	面积/km ²	入河 BOD ₅	入河 COD	入河 TN	入河 NH ₃ -N
湖东区	16 947.0	1.975 3	4.938 2	0.911 6	0.091 1
单位面积入河 负荷量/t·km ⁻²		1.17	2.91	0.54	0.05
湖西区	23 511.0	1.633 7	4.084 4	0.455 3	0.045 5
单位面积入河 负荷量/t·km ⁻²		0.69	1.74	0.19	0.02
沿线总计	40 458.0	3.609 0	9.022 6	1.366 9	0.136 6
单位面积入河 负荷量/t·km ⁻²		0.89	2.23	0.34	0.03

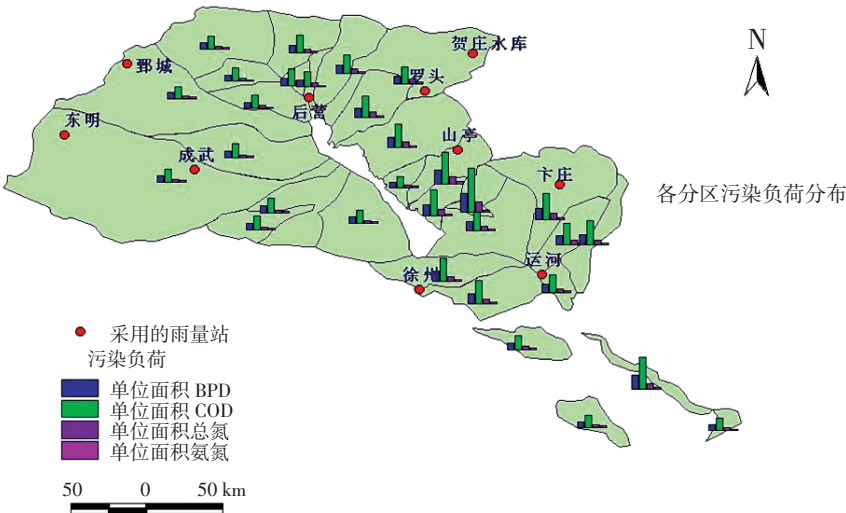


图 5 污染负荷分区图

Figure 5 Pollutant loading distribution of the study area

表 2 研究区污染负荷在时间上的分配

Table 2 Monthly loadings in study area

月份	平均降雨量/mm	NH ₄ ⁺ -N/t	COD/t
1	10.6	20.02	1 322.27
2	12.7	23.98	1 584.23
3	24.4	46.08	3 043.71
4	40.6	76.68	5 064.53
5	50.9	96.13	6 349.38
6	92.3	174.31	11 513.70
7	205.3	387.72	25 609.56
8	148.6	280.64	18 536.68
9	67.1	126.72	8 370.20
10	38.1	71.95	4 752.68
11	22.2	41.93	2 769.28
12	10.6	20.02	1 322.27
全年	723.3	1 366.00	90 226.00
汛期(6月—9月)	513.30	969.40	64 030.15
非汛期	210.00	396.60	26 195.85

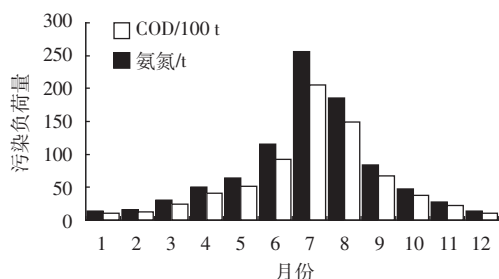


图 6 污染负荷年内分布

Figure 6 Monthly loads of ammonia nitrogen and COD

荷的产生,是农业面源污染控制和水质保护的关键。

4 结论

通过面源污染负荷估算方法,模拟计算了南水北调东线工程淮河流域段的农业面源污染入河负荷,分别为BOD₅约3.61万t·a⁻¹,COD 9.02万t·a⁻¹,TN 1.37万t·a⁻¹,NH₄⁺-N 0.14万t·a⁻¹。本文没有考虑农村分散畜禽养殖和生活污水排放的面源污染物,仅对研究区农业面源污染负荷进行计算分析。从空间分布上来看,东部地区的污染负荷贡献较大,西部所占比例较小。在时间分布上,农业面源污染主要集中在汛期(6月—9月),污染负荷约占全年总量的70%。

根据山东省环保局提供的流域沿线水质目标和水体自净能力测算^①,调水沿线每年的COD允许纳污量仅为13.21万t。本文计算结果,仅来自农业面源污染的COD就高达9.02万t,而且面源污染控制比点

源污染要难得多,可见南水北调沿线面源污染的防治任务十分艰巨,只有有效地控制农业面源污染,减少入河污染负荷量,才能最终保障南水北调东线工程的输水水质达标。

参考文献:

- [1] 张玉华,刘东生,徐哲,等.南水北调东线农业面源污染现状及综合防治对策[C]//中国农业工程学会2005年学术年会论文集,2005.6-8.
ZHANG Yu-hua, LIU Dong-sheng, XU Zhe, et al. The study on the agricultural non-point pollution along the East Line of snwt [C]//Chinese Society of Agricultural Engineering(CSAE): Annual Meeting symposium, 2005. 6-8.
- [2] 山东农业生态环保学会.关于南水北调东线山东段农业面源污染防治对策的建议[J].学会,2003(2):55-56.
The society of agricultural eco-environmental protection of Shandong province. Suggestions on agricultural non-point source pollution control along the East Line of South-to-North Water Transfer Project[J]. *The Society*, 2003(2):55-56.
- [3] 庞煜,龙腾锐,尘峰,等.南水北调东线山东段沿线水污染现状调查与分析[J].给水排水,2002,28(8):18-21.
PANG Yu, LONG Teng-rui, CHEN Feng, et al. Water pollution investigation in Shandong Province along the East Line of South-to-North Water Transfer Project(SNWT)[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2002, 28(8):18-21.
- [4] 刘玉年,万一,徐亚东.南水北调东线一期工程水质分析[J].河海大学学报(自然科学版),2005,33(3):264-268.
LIU Yu-nian, WAN Yi, XU Ya-dong. Water quality analysis for the first stage of South-to-North Water Transfer East Line Project[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2005, 33(3):264-268.
- [5] 刘洪林,邢文洁,王素芬,等.南水北调东线输水干线南四湖水环境质量研究[J].水文,2003,23(4):49-51.
LIU Hong-lin, XING Wen-jie, WANG Su-fen, et al. Study on water environment along the East Line of South-to-North Water Transfer Project[J]. *Hydrology*, 2003, 23(4):49-51.
- [6] 戴树桂.环境化学[M].第二版.北京:高等教育出版社,2006.
DAI Shu-gui. Environmental chemistry[M]. version 2. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [7] 鲁孟胜,孔凡顺,庄学厚.山东西南部南四湖流域环境地质综合调查[J].中国地质,2003,30(4):424-428.
LU Meng-sheng, KONG Fan-shun, ZHUANG Xue-hou. Comprehensive environmental geological survey of the Nansi Lake drainage area, southwestern Shandong[J]. *Geology in China*, 2003, 30(4):424-428.
- [8] 刘铭环.竹竿河流域面源污染模型研究[D].北京:清华大学,2005.
LIU Ming-huan. Study on the non-point source pollution of Zhuganhe watershed[D]. Beijing: Tsinghua university, 2005.

致谢:论文所用基础数据系淮河水利委员会提供,谨致谢意。

①南水北调东线工程山东段农业面源污染治理规划(2004)