

doi:10.3799/dqkx.2012.044

# 基于地下水模拟的保定地区生态需水量计算

张建立<sup>1</sup>,王东胜<sup>2</sup>,潘世兵<sup>3</sup>

1. 中国水利水电科学研究院国际合作处,北京 100038
2. 中国水利水电科学研究院水电中心,北京 100038
3. 中国水利水电科学研究院遥感中心,北京 100038

**摘要:** 为了计算保定地区生态需水量,建立了地下水模拟模型. 模拟结果表明,研究范围每年需要消耗 0.64 亿  $m^3$  左右地下水,水位呈持续下降趋势. 为了调控潜水地下水位,达到生态恢复的目的,模拟了减少开采量和扩大白洋淀面积到 1975 年水平的情况,结果表明当地下水开采量减少 1.47 亿  $m^3$  时,每年补给地下水贮存量的水量约 0.8 亿  $m^3$ ,使得地下水水位大面积恢复,很大范围达到了潜水生态标准. 根据此水位计算的生态亏空量约为 15 亿  $m^3$ . 该研究成果对我国的半湿润半干旱地区地下水生态环境恢复有借鉴意义.

**关键词:** 地下水;模型;遥感;生态需水;水文地质.

中图分类号: P641.2

文章编号: 1000-2383(2012)02-0370-05

收稿日期: 2011-09-10

## Calculation of Ecological Water Requirements Based on Groundwater Model in Baoding

ZHANG Jian-li<sup>1</sup>, WANG Dong-sheng<sup>2</sup>, PAN Shi-bing<sup>3</sup>

1. Division of International Cooperation, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China
2. National Research Center for Sustainable Hydropower Development, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China
3. Remote Sensing Technology Application Research Center, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China

**Abstract:** Groundwater model is set up to calculate ecological water requirements in Baoding, Hebei Province. Modeling results show that a total of  $6.4 \times 10^7 m^3$  groundwater is consumed annually under current situation which leads to continual decline of groundwater level. Modeling scheme is designed considering reducing groundwater yield and restoring water body of Baiyangdian to that of 1975. The results show that it is possible to restore water body of Baiyangdian to that of 1975 with an annual groundwater supplement of about  $8.0 \times 10^7 m^3$  while reducing groundwater yield by  $1.47 \times 10^8 m^3$ . The groundwater level reaches ecological level. Ecological water requirements is about  $1.5 \times 10^9 m^3$ . This study is of importance to groundwater eco-environment restoration in semi-humid area and semi-arid area.

**Key words:** groundwater; models; remote sensing; ecological water requirements; hydrogeology.

## 0 引言

由于人口增长和城市化进程加快,工农业经济迅猛发展,使流域内需水量不断增加(Abbaspoura and Nazaridou, 2007). 过度开发利用水资源,导致了流域生态环境逐渐恶化. 例如,河道断流、湖泊沼泽湿地萎缩、水污染加剧和地面沉降等,成为十分突出的生态环境问题(Costanza and Jorgensen,

2002). 这些生态环境问题又进一步加剧了水资源缺乏程度,成为区域社会经济可持续发展的重要制约因素. 生态环境保护 and 恢复,成为社会广泛关注的问题. 生态需水研究是合理配置水资源、实现水资源可持续利用的基础(王芳等,2002a, 2002b;尹健梅等,2009;高凡等,2011),为科学解决水与生态环境的矛盾问题,研究者们进行了一系列生态需水理论与方法研究,为流域水资源合理配置及生态系统保护或

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 50679086).

作者简介:张建立(1974-),男,教授级高工,主要从事水文学水资源方面的研究和国际合作管理方面的工作. E-mail: zhangjl@iwhr.com

恢复奠定理论基础(王根绪和程国栋,2002;冯夏清和章光新,2008;胡广录等,2008;张丽等,2008;崔瑛等,2010)。

地下水是生态环境重要的组成部分,尤其是在半干旱半湿润地区,地下水也是生态环境中最活跃、最敏感的因子,水资源枯竭、植被退化、湿地萎缩、土壤盐碱化等生态环境问题都与地下水有直接或间接的关系。本文以河北保定地区为例,开展地下水系统生态需水模拟研究,为地下水生态环境恢复方案的制定提供先进的技术方法。

## 1 地下水模型的建立

保定市位于河北省中部,东接廊坊市,西临山西省,南靠衡水市和石家庄市,北与张家口和北京市为邻。保定地区的白洋淀位于太行山东麓永定河冲积扇与滹沱河冲积扇之间的低洼地区,是海河流域大清河水系的主要组成部分,共有大小淀泊 143 个、沟濠 3 700 余条。淀底高程一般在 5.5~6.5 m 之间。河北省保定市是华北平原地下水降落漏斗的中心之一。

### 1.1 地下水概念模型

为了准确模拟白洋淀地区的地下水状态,将西部边界扩到山前,模拟总面积为 3 416 km<sup>2</sup>。研究区位于河北平原的西北部,包括保定市、安新县、雄县、徐水县、易县、容城县、顺平县等部分地区(图 1)。通过分析和研究区域水文地质条件与有关的地下水位长期观测资料、地下水开采状况等,将研究区地下水混合开采层概化为统一的地下水系统,将其概化为非均质各向同性的、与外界环境有着密切联系的开放性系统。

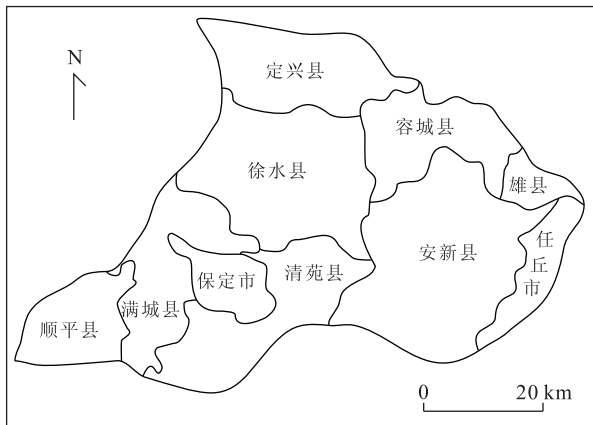


图 1 研究区范围  
Fig. 1 Scope map of study area

### 1.2 地下水数学模型

(1)数学模型及其解法. 以非均质、各向异性、平面二维潜水含水层作为模拟对象,地下水流微分方程及其定解问题为:

$$\begin{cases} \mu \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K_1 (h-b) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K_2 (h-b) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + Q + \varepsilon, \\ (x, y) \in \Omega, t \geq 0; \\ h(x, y, t) |_{t=0} = h_0(x, y), (x, y) \in \Omega, t \geq 0; \\ h |_{\Gamma_1} = h_1, (x, y) \in \Gamma_1, t \geq 0; \\ (h-b)K \frac{\partial h}{\partial n} |_{\Gamma_2} = q(x, y, t), (x, y) |_{\Gamma_2}, t \geq 0. \end{cases}$$

式中: $h$  为地下水位标高(m); $K_x$ 、 $K_y$  分别表示  $x$ 、 $y$  方向的渗透系数(m/d); $\mu$  为潜水含水层的给水度; $b$  为含水层底板标高(m); $h-b$  为含水层的厚度; $\Omega$  为渗流区域; $\Gamma_1$  为一类边界; $\Gamma_2$  为二类边界; $h_0(x, y)$  为含水层初始水位标高(m); $h_1$  为含水层一类边界水位标高(m); $q(x, y)$  为含水层二类边界单宽流量(m<sup>2</sup>/d),注入为正,流出为负,隔水边界为 0; $Q$  为含水层的开采强度(m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>·m<sup>-2</sup>); $\varepsilon$  为含水层的垂向补排强度(m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>·m<sup>-2</sup>)。

(2)初始水头和模拟时段的划分. 研究区的地下水位变化有明显的季节性规律,按时间可分为平、低、高、平 4 个变化过程. 从 1 月开始地下水位缓慢上升至 2 月止,此后随着开采量的增加,水位自 3 月开始转为下降,5~6 月达到最低水位. 初始流场从 1998 年开始,根据已有资料并考虑地下水模拟的稳定性,将模拟时间定为 30 年。

(3)水文地质参数分区. 根据地下水的形成条件和地下水混合开采层的岩性、厚度及埋藏条件,将研究区划分为 5 个参数分区(图 2),并将每一分区概化为均质各向同性的含水层。

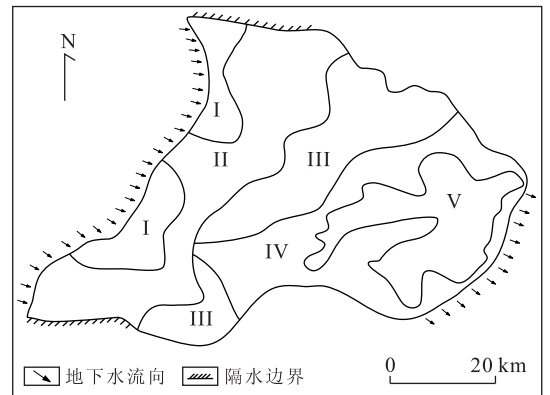


图 2 水文地质参数分区  
Fig. 2 Hydrogeological parameter subarea and boundary conditions

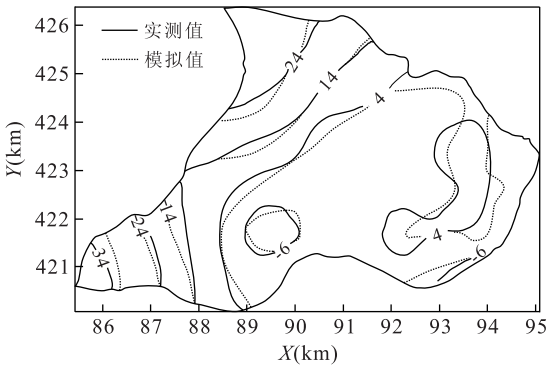


图 3 1999 年实测值和模拟值流场图对比

Fig. 3 Comparison of the modeled and observed groundwater flow field in 1999

表 1 参数识别结果

Table 1 Groundwater model parameter identification results

分区	渗透系数 $K(\text{m}/\text{d})$	给水度 $\mu$	降雨入渗补 给系数 $\alpha$	蒸发系数 $C$	灌溉回归 系数 $\beta$
I	98	0.24	0.26	—	0.20
II	76	0.15	0.21	—	0.20
III	52	0.13	0.17	—	0.18
IV	15	0.10	0.12	—	0.13
白洋淀	5	0.08	—	—	—

(4)源汇项处理. 降雨入渗系数主要考虑包气带岩性和水位埋深. 灌溉主要考虑各个行政区收集的农业开采量的资料, 以及落在研究范围内耕地面积的大小. 河流入渗量放到补给项中实现, 补给量的大小根据以往河流入渗统计结果计算. 开采量根据各行政区浅层地下水开采量的统计值, 利用 GIS 的统计功能展布到各行政区域内. 潜水蒸发集中的白洋淀地区, 其蒸发量利用多年平均蒸发量与潜水蒸发系数得到.

(5)其他边界处理. 研究区的北部和南部地区定义为隔水边界. 西部为山前侧向补给, 向东有一部分排泄出研究区. 由于边界上有流量交换, 定义为 GHB 边界(通用水头边界). 白洋淀淀底高程 5.5~6.5 m, 汛期水位 8.3 m, 将其定义为定水头边界.

### 1.3 模型识别与校正

地下水系统数值模型的识别与验证, 就是利用系统输入和输出的历史观测资料, 对模型进行确定和检验, 以使模型能真实地反映地下水系统状态的发展变化规律, 提高模型的模拟精度等. 从 1998 年开始, 利用两年的资料进行识别. 结果表明, 模拟的与实际的地下水流场形态基本一致, 且符合当地水文地质条件(图 3). 研究区内参数识别的结果见表 1.

## 2 生态需水计算

### 2.1 生态需水计算标准

根据白洋淀湿地的生态倒退过程, 初步判断鸟类的大幅度下降在 20 世纪 60 年代到 70 年代的 20 年时间内. 从现有鱼类退化过程来看, 快速衰退的时间大约在 1965—1975 年期间, 这里不仅包含水量减少引起的退化, 同时也包括水利工程对环境的改变, 如破坏产卵环境. 从水量的变化来看, 整个 60 年代白洋淀的蓄水量不比 50 年代少, 说明湿地的需水没有减少, 可以推断湿地的面积也没有减少或减少不大. 白洋淀湿地从稳定状态到退化的快速变化阶段在 1970—1975 年期间, 即 20 世纪 70 年代前期, 首先考虑湿地生态恢复到 1975 年的水平.

在农业生产实践中, 一般以毛细管水上升高度表示的临界深度称为地下水安全深度, 根据华北平原降雨量和土壤质地特点, 华北平原 3 m 的潜水埋深是防止盐碱化的安全深度. 同时为增加潜水的补给能力, 地下潜水埋深保持在 4 m 左右. 另外, 根据德州站的多年观测资料, 从入渗量和蒸发量损耗差, 也得出浅层地下水最佳埋深在 4 m 左右. 保定地区的生态需水通过两方面控制, 一方面将白洋淀水位恢复到 1975 年的水平, 另一方面, 将地下水水位抬升到合理的水平来计算调控的开采量, 推算该区的生态需水量.

### 2.2 现状开采水平条件下地下水水位变化

假设开采条件不变, 利用降雨量、灌溉入渗、河流入渗等多年平均值, 结合白洋淀多年平均水位, 预报现状开采条件下地下水水位的变化情况.

从流场图(图 4)上可以看出, 地下水的整体流向是从山前向平原区流动, 最大的漏斗区位于保定

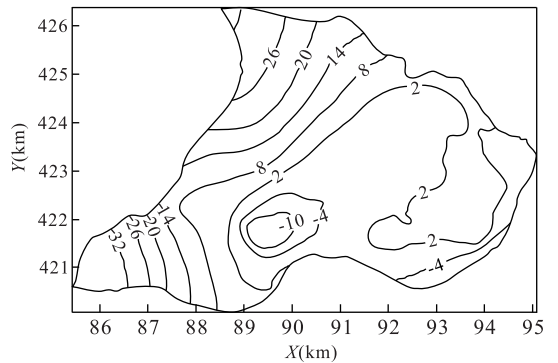


图 4 现状开采量情况下 30 年后的流场

Fig. 4 Groundwater flow field after 30 years under current groundwater yield

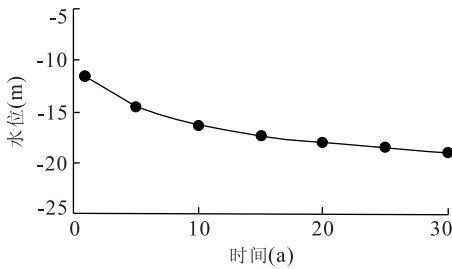


图 5 现状开采条件下保定漏斗水位下降

Fig. 5 Groundwater recession in Baoding under current groundwater yield

地区. 在漏斗区, 四周的地下水流向漏斗区. 人工开采为保定市地下水位降落漏斗发展变化的主要因素. 随着对地下水的持续开采, 保定漏斗有持续增大、加深的趋势, 30 年后漏斗区地下水位将继续降低 6 m 左右, 漏斗中心地下水位下降速度约为 0.20 m/a(图 5).

从均衡项分析可知, 白洋淀补给地下水的量约为 0.20~0.23 亿  $m^3$ . 由于地下水的开采, 降落漏斗范围扩大, 这个量有逐渐增加的趋势. 研究区地下水的补给项主要是降雨、灌溉入渗等, 其主要排泄方式为人工开采. 研究区的蒸发主要集中在白洋淀地下水浅埋区, 蒸发量约 0.27 亿  $m^3/a$ . 由于人工开采量较大, 每年有 0.64 亿  $m^3$  左右的水量需要地下水的贮存量来提供.

### 2.3 恢复到 1975 年白洋淀水面面积时地下水动态变化

首先考虑湿地生态恢复到 1975 年的水平下地下水位的变化情况. 通过 1975 年 5 月份的 MMS 遥感影像可以分辨清楚的是水面和沼泽, 其中白洋淀的边界范围按遥感影像解译的成果定义.

从流场图可以看出, 地下水的整体流向是从山前向平原区流动. 最大的漏斗区位于保定地区, 漏斗中心的地下水位在 30 年后下降约 6 m. 在漏斗区, 四周的地下水流向漏斗区. 白洋淀周围地下水位局部有所上升. 说明白洋淀恢复到 1975 年水面水平后, 由于开采量仍维持原来水平, 对保定漏斗影响不明显.

从均衡项结果可以看出, 由于白洋淀水面恢复到 1975 年的水平, 局部水位有所升高, 造成白洋淀向周围地下水的补给量有所增大, 补给地下水的量基本稳定在 0.38 亿  $m^3$  左右, 比目前增加了约 0.10 亿  $m^3$ . 每年蒸发量为 0.32 亿  $m^3$  左右. 由于白洋淀水面面积扩大, 在人工开采情况不变的情况下, 每年需要的地下水贮存量为 0.55 亿  $m^3$  左右.

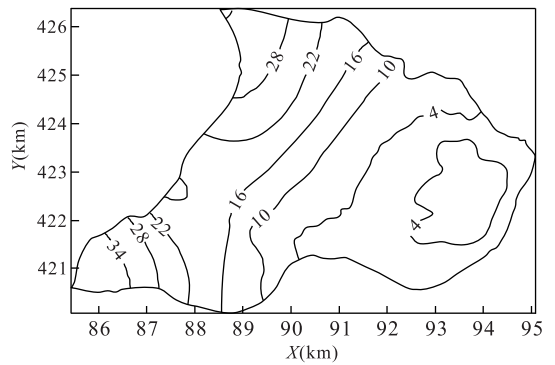


图 6 考虑水面恢复到 1975 年水平和调控开采量情况下 30 年后的流场

Fig. 6 Modeling results considering reducing groundwater yield and restoring water body to 1975

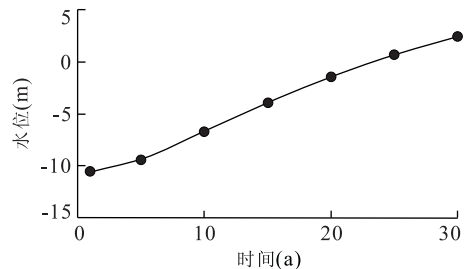


图 7 考虑水面恢复到 1975 年水平和调控开采量情况下保定漏斗中心水位变化

Fig. 7 Groundwater level considering reducing groundwater yield and restoring water body to 1975

### 2.4 生态需水量计算

既考虑白洋淀水面面积恢复到 1975 年的水平, 又将地下水水位抬升到合理的水平, 通过计算调控的开采量, 推算该区的生态需水量. 其中保定地区由于处在漏斗中心, 开采量减少 2/3, 安新县内地下水位埋深较浅, 开采量不变, 其余行政区开采量减少 1/2. 其计算结果为每年开采量减少 1.47 亿  $m^3$ , 表现为水面面积扩大, 地下水位大幅回升(图 6). 地下水位在 4 m 以内的区域大大增加, 扩大到 1039  $km^2$ , 平原区大部分地区地下水埋深小于 8 m. 保定漏斗也逐渐恢复, 漏斗恢复速率约 0.5 m/a(图 7).

从地下水的均衡量可以看出, 由于开采量的减少, 使得总补给量大于总排泄量, 总体可以补给地下水的贮存量, 使得地下水的水位得以恢复. 每年补给地下水水量约 0.8 亿  $m^3$ . 地下水位升高后, 白洋淀补给地下水的量有所减少, 约 0.35 亿  $m^3$ . 根据此方案恢复白洋淀水面面积和调控开采量后, 研究区范围内潜水达到了生态需水的标准, 认为从现状水位上升到这个水位需要的量即为地下水的亏空量. 通

通过对 2 个水位面之间的体积分析,得到亏空的体积,再与分区给水度相乘得出研究区的亏空量约为 15 亿  $m^3$ 。

### 3 结论和建议

(1)数值模型预测结果分析表明,由于人工开采量较大,保定地区研究范围每年需要消耗 0.64 亿  $m^3$  左右地下水的贮存量。白洋淀每年的渗漏量约为 0.22 亿  $m^3$ ,保定市漏斗区由于受持续超采的影响,水位呈持续下降趋势,30 年后漏斗中心水位下降约 6 m。研究区的生态环境在继续恶化。(2)模拟了将白洋淀水面面积恢复到 1975 年的水平时地下水水位的变化情况,结果表明白洋淀水位的提升对保定漏斗的下降影响不大。保定漏斗中心每年的下降速度仍约 0.2 m/a,但局部提高了白洋淀周围地下水水位。白洋淀补给地下水的量为 0.38 亿  $m^3$  左右,每年需要的地下水贮存量为 0.55 亿  $m^3$  左右。(3)为了调控潜水地下水水位,达到生态恢复的目的,通过减少开采量来对地下水的情况进行了模拟。结果表明,当地下水开采量减少 1.47 亿  $m^3$  时,每年补给地下水贮存量约 0.8 亿  $m^3$ ,使得地下水的水位得以大面积恢复。保定漏斗中心区的恢复速率约 0.5 m/a。在减少开采量和扩大白洋淀面积条件下,白洋淀周围的地下水水位逐年回升,地下水埋深小于 4 m 的范围扩大到了 1 039  $km^2$ ,很大范围达到了潜水生态标准。根据此水位计算的生态亏空量为 15 亿  $m^3$ 。

### References

Abbaspoura, M., Nazaridoustb, A., 2007. Determination of environmental water requirements of Lake Urmia, Iran: an ecological approach. *International Journal of Environmental Studies*, 64(2): 161–169. doi: 10.1080/00207230701238416

Costanza, R., Jorgensen, S. E., 2002. Understanding and solving environmental problems in the 21st century. Elsevier, Amsterdam.

Cui, Y., Zhang, Q., Chen, X. H., et al., 2010. Advances in the theories and calculation methods of ecological water requirement. *J. Lake Sci.*, 22(4): 465–480 (in Chinese with English abstract).

Feng, X. Q., Zhang, G. X., 2008. Research advances in wetlands ecological water requirement. *Chinese Journal of Ecology*, 27(12): 2228–2234 (in Chinese with English abstract).

Gao, F., Huang, Q., Chang, J. X., 2011. Progress and per-

spectives on ecological water requirement in China. *Resources and Environment in the Yangtza Basin*, 20(6): 755–760 (in Chinese with English abstract).

Hu, G. L., Zhao, W. Z., Xie, G. X., 2008. Advances on theories of ecological water requirements of vegetation in arid area. *Advances in Earth Science*, 23(2): 193–200 (in Chinese with English abstract).

Wang, F., Liang, R. J., Yang, X. L., et al., 2002. A study of ecological water requirements in Northwest China I: theoretical analysis. *Journal of Natural Researches*, 17(1): 1–8 (in Chinese with English abstract).

Wang, F., Wang, H., Chen, M. J., et al., 2002. A study of ecological water requirements in northwest China II: application of remote sensing and GIS. *Journal of Natural Resources*, 17(2): 129–137 (in Chinese with English abstract).

Wang, G. X., Cheng, G. D., 2002. Water demand of ecosystem and estimate method in arid inland river basins. *Journal of Desert Research*, 22(2): 129–134 (in Chinese with English abstract).

Yin, J. M., Cheng, W. Q., Yan, L., et al., 2009. Change of water resources in the Baiyangdian wetland. *Water Resources Protection*, 25(1): 52–55 (in Chinese with English abstract).

Zhang, L., Li, L. J., Liang, L. J., et al., 2008. Progress on the research of theory and calculation method of ecological water requirement. *Transactions of the CSAE*, 24(7): 307–312 (in Chinese with English abstract).

### 附中文参考文献

崔瑛, 张强, 陈晓宏, 等, 2010. 生态需水理论与方法研究进展. *湖泊科学*, 22(4): 465–480.

冯夏清, 章光新, 2008. 湿地生态需水研究进展. *生态学杂志*, 27(12): 2228–2234.

高凡, 黄强, 畅建霞, 2011. 我国生态需水研究现状、面临挑战与未来展望. *长江流域资源与环境*, 20(6): 755–760.

胡广录, 赵文智, 谢国勋, 2008. 干旱区植被生态需水理论研究进展. *地球科学进展*, 23(2): 193–200.

王芳, 梁瑞驹, 杨小柳, 等, 2002a. 中国西北地区生态需水研究(1)——干旱半干旱地区生态需水理论分析. *自然资源学报*, 17(1): 1–8.

王芳, 王浩, 陈敏建, 等, 2002b. 中国西北地区生态需水研究(II)——基于遥感和地理信息系统技术的区域生态需水计算及分析. *自然资源学报*, 17(2): 129–137.

王根绪, 程国栋, 2002. 干旱内陆流域生态需水量及其估算——以黑河流域为例. *中国沙漠*, 22(2): 129–134.

尹健梅, 程伍群, 严磊, 等, 2009. 白洋淀湿地水文水资源变化趋势分析. *水资源保护*, 25(1): 52–55.

张丽, 李丽娟, 梁丽乔, 等, 2008. 流域生态需水的理论及计算研究进展. *农业工程学报*, 24(7): 307–312.