

吴瑞, 刘桂环, 文一惠. 基于 InVEST 模型的官厅水库流域产水和水质净化服务时空变化[J]. 环境科学研究, 2017, 30(3): 406-414
WU Rui, LIU Guihuan, WEN Yihui. Spatiotemporal variations of water yield and water quality purification service functions in Guanting Reservoir Basin based on InVEST model[J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(3): 406-414.

基于 InVEST 模型的官厅水库流域产水和水质净化服务时空变化

吴瑞^{1,2}, 刘桂环^{2*}, 文一惠²

1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083
2. 环境保护部环境规划院, 北京 100012

摘要: 官厅水库是北京市及其周边地区重要的水源地之一, 曾因水质污染严重而被迫退出北京市饮用水供应系统, 经过全面治理后于 2007 年恢复成为北京市备用水源地. 为了从整体上定量分析官厅水库流域生态系统的产水和水质净化服务, 基于 InVEST 模型, 选择官厅水库退出北京市饮用水供应系统和恢复成为北京市备用水源地为时间节点, 定量评估 1995—2010 年官厅水库流域生态系统的产水量和 TN、TP 输出量, 分析其产水服务和水质净化服务的时空变化. 结果表明: 1995—2010 年, 官厅水库流域产水服务表现为先减弱后增强, 但整体呈减弱趋势, 流域产水量由 1995 年的 $18.85 \times 10^8 \text{ m}^3$ 降至 2010 年的 $14.33 \times 10^8 \text{ m}^3$, 产水服务减弱 24.0%. 水质净化服务表现为先减弱后增强, 但整体呈增强趋势, 流域的 TN、TP 输出量分别由 1995 年的 4 028.7、379.7 t 降至 2010 年的 3 611.4 和 354.0 t, TN、TP 净化服务分别增强 10.4% 和 6.8%. 研究显示, 气候变化和土地利用变化是导致官厅水库流域产水服务发生改变的主要原因, 不同时期的水资源保护政策导向也与水质净化服务变化趋势相吻合.

关键词: 官厅水库流域; InVEST 模型; 时空变化; 水质净化; 产水量

中图分类号: X826

文章编号: 1001-6929(2017)03-0406-09

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2017.01.73

Spatiotemporal Variations of Water Yield and Water Quality Purification Service Functions in Guanting Reservoir Basin based on InVEST Model

WU Rui^{1,2}, LIU Guihuan^{2*}, WEN Yihui²

1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China
2. Chinese Academy for Environment Planning, Beijing 100012, China

Abstract: Guanting Reservoir (GR) is one of the most important water sources in both Beijing and its neighboring regions. Because of water pollution, it was once withdrawn from the local drinking water supply system. After thorough treatment, GR has been a spare water source since 2007. In order to do a quantitative overall analysis of the services of both water yield and water purification in GR basin, two time points were selected: when GR was withdrawn from the local drinking water supply system and when it became the spare water source. The quantities of water yield, total nitrogen and total phosphorus outputs were evaluated during 1995 to 2010 based on the InVEST model. Besides, the spatiotemporal variations of the water yield service and water quality purification service in GR basin were analyzed. The results showed that the water yield service in GR basin from 1995 to 2010 was weakened at first and then increased, but overall it was weakened. Water yield capacity in the basin decreased from $18.85 \times 10^8 \text{ m}^3$ in 1995 to $14.33 \times 10^8 \text{ m}^3$ in 2010 (a decrease of 24.0%). Water quality purification service was weakened at first and then enhanced, and overall it was enhanced. The total nitrogen output decreased from 4028.7 t (in 1995) to 3611.4 t (in 2010) while the total phosphorus decreased from 379.7 t (in 1995) to 354.0 t (in 2010). Nitrogen and phosphorus purification services were enhanced by 10.4% and 6.8%, respectively. The changes to the climate and land use were the main factors which led to the changes of water yield service in GR basin. In addition, water resource protection-oriented policies in different periods have matched the variation trend of water quality purification service.

收稿日期: 2016-06-27 修订日期: 2016-12-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379084)

作者简介: 吴瑞(1992-) 男, 安徽怀宁人, wurui@bjfu.edu.cn.

* 责任作者: 刘桂环(1976-) 女, 吉林松原人, 研究员, 博士, 主要从事生态经济、环境经济政策研究, liugh@caep.org.cn

Keywords: Guanting Reservoir Basin; InVEST model; spatiotemporal variations; water quality purification; water yield

生态系统服务是指生态系统与生态过程所形成及所维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用^[1].具有极高甚至无法计量的价值,与人类福祉关系极其密切^[2].产水服务和水质净化服务是流域生态系统研究中非常重要的两项服务,对水量和水质的变化有直接影响,针对产水服务和水质净化服务的研究逐渐成为水文学和流域管理领域的研究热点^[3-5].以往对于生态系统服务的评估多是基于土地利用类型,同时结合因子分析法进行研究^[6-8],但所得结果存在动态研究不足、评价结果单一、缺乏空间概念的问题^[9-11].近年来,随着GIS、RS等技术的发展,一些研究者开始借助于模型工具的方法来进行研究,这成为解决上述问题的一个突破口.InVEST模型^[12]是其中较为成熟、应用较为广泛的一种,在国外的应用研究相对成熟,研究热点多集中于运用该模型多个模块对生态系统服务进行综合评估,并将评估结果用于规划管理中.如Nelson等^[13-14]分别研究了威拉米特河盆地和非洲西部加纳、科特迪瓦两地的土地利用变化,运用InVEST模型评估了由此造成的生态系统服务变化;Goldstein等^[15-16]分别运用该模型多个模块对夏威夷瓦胡岛和美国加利福尼亚州内达华山脉进行了综合生态系统服务评估,将研究结果应用于当地的决策方案筛选与水资源保护规划中.国内相关研究起步相对较晚,目前多是运用InVEST模型针对某一区域进行单一或综合的生态系统服务评估,如ZHANG等^[17-18]分别对西苕溪流域和三江源区的产水量进行了评估;白杨等^[19]运用该模型生物多样性、水源涵养以及水质净化等6个模块对白洋淀流域的生态系统服务进行了综合评价和空间分布特征分析.综上,InVEST模型是一种有效的评估自然资本和空间化分析的工具,能够为管理决策的制订提供参考.

官厅水库对于保障北京市及其周边地区的饮用水安全具有重大意义,但到目前为止仍缺乏针对该区域产水服务和水质净化服务的研究.当前针对官厅水库的研究主要集中于水库水体污染、周边土壤污染、水质演变等方面^[20-21],尚没有从生态系统服务角度进行有关水量与水质的研究.为全面认识并充分发挥官厅水库流域生态系统服务功能,积极维护首都水生态安全,开展该区域产水服务和水质净化服务的时空变化及其驱动因素研究十分必要.

该研究以官厅水库流域为研究区域,将InVEST模型运用于该区域的产水服务评估和水质净化服务评估之中;同时,关注政策因素对官厅水库水质变化

的影响,并以官厅水库退出北京市饮用水供应系统和恢复成为北京市备用水源地为时间节点,选取1995年、2000年、2010年三期InVEST模型所需数据进行评估,分析该时段内官厅水库流域产水服务和水质净化服务的时空变化,并探讨其驱动因素,以期完善官厅水库水资源管理工作、改善官厅水库水环境提供科学依据和有效参考.

1 研究区概况

官厅水库位于河北省张家口市怀来县和北京市延庆县境内,自1954年建库以后,曾一度是北京市最重要的水源地之一.但在20世纪80年代中期,官厅水库遭受严重的有机污染,并不断恶化^[22].1997年5月,官厅水库被迫退出北京市饮用水供应系统;2003年,北京市政府为缓解北京市水资源供需矛盾,决定对官厅水库进行全面治理,最终于2007年10月使官厅水库恢复成为北京市备用水源地.水库入库水系有桑干河、洋河和妫水河,流域总面积46768 km².该研究所选的流域范围包括北京市延庆县的妫水河流域、门头沟区境内的部分永定河流域及河北省张家口市境内的洋河流域(包括清水河)、桑干河流域(包括壶流河),面积34151 km²,约占官厅水库流域总面积的3/4.该区域为影响官厅水库水量及水质变化的主要区域,极具代表意义.研究区地处蒙古高原与华北平原之间,为温带半干旱区,属大陆季风型气候,夏短冬长,多风少雨,气候干燥,多年平均降水量为400~600 mm,降水的季节分配差异很大,主要集中在6—9月.

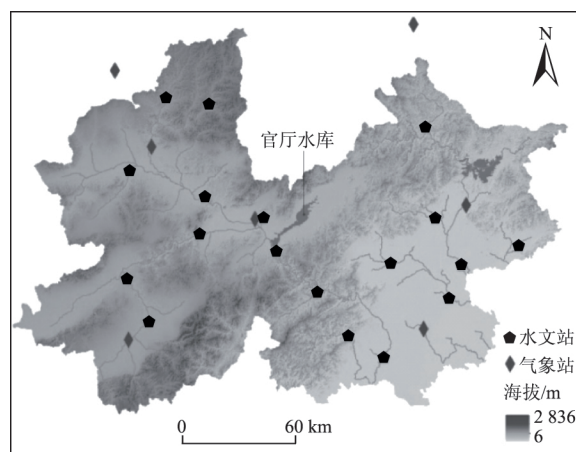


图1 研究区地理位置

Fig.1 Location map of the study area

2 数据与方法

2.1 数据来源及处理

InVEST模型所需数据包括土地利用数据、DEM、

气象数据、年潜在蒸发量、土壤深度、植物可利用水含量、流域和子流域边界、生物物理属性以及氮磷输出负荷数据。土地利用数据来源于中国科学院资源环境数据中心,选取1995年、2000年、2010年三期数据,经接边、转换、裁剪等处理得到研究区域30 m分辨率的土地利用栅格数据;DEM数据来源于地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn>)提供的30 m分辨率的GDEM V2数字高程数据,经镶嵌、裁剪和填洼等处理,生成DEM数据;气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.gov.cn>),为规避单一年份数据的低代表性,选取3个时段(1993—1997年、1998—2002年、2008—2012年)气象数据的多年平均值,对研究区域及周边共25个气象站点和水文站点的降水量数据进行克里金插值,生成相应年份30 m分辨率的栅格图;年潜在蒸发量采用针对华北地区经过系数校正后的Hargreaves公式^[23]进行计算:

$$ET_0 = 0.001 \times R_a \times (T_{\max} - T_{\min})^{0.66} \times \left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} + 34.5 \right) \quad (1)$$

式中: ET_0 为潜在蒸发量, mm/d; T_{\max} 和 T_{\min} 分别代表

日最高温均值和日最低温均值, °C; R_a 为太阳大气顶层辐射, mm/d。太阳大气顶层辐射数据是通过NASA网站(<https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETSscreen>)查询研究区域内各气象站点和水文站点的太阳辐射值,并将太阳辐射值除以50%所得^[24]。

对计算得出的25个气象站点和水文站点的年潜在蒸发量进行克里金插值,生成研究区域相应年份30 m分辨率的潜在蒸发量数据;土壤深度和植物可利用水含量均来源于寒区旱区科学数据中心的土壤数据集(<http://westdc.westgis.ac.cn/data/611f7d50-b419-4d14-b4dd-4a944b141175>),通过属性空间栅格化之后获得,其中植物可利用水含量数据根据ZHOU等^[25]的非线性拟合土壤AWC估算模型经过计算后得到;流域和子流域边界是运用Arc-SWAT工具对研究区域的DEM数据进行小流域划分处理后得到,生成的子流域是作为模型统计结果的输出单元;生物物理属性以及氮磷输出负荷数据参考InVEST用户指南和查阅研究区附近区域的相关文献^[26-29]后估算获得,该研究采用的氮磷输出相关参数见表1。

表1 氮磷输出相关参数

Table 1 Output parameters of nitrogen and phosphorus

土地利用/覆被类型	TN 负荷/ [kg/(hm ² ·a)]	TP 负荷/ [kg/(hm ² ·a)]	TN、TP 共同 截留效率	土地利用/覆被类型	TN 负荷/ [kg/(hm ² ·a)]	TP 负荷/ [kg/(hm ² ·a)]	TN、TP 共同 截留效率
阔叶林	2.38	0.15	0.84	农田	22.80	1.25	0.40
针叶林	4.38	0.35	0.78	旱地	20.20	2.06	0.27
针阔混交林	3.38	0.25	0.81	园地	9.01	1.31	0.35
灌木林	4.85	0.43	0.65	城镇	5.51	0.25	0.01
灌草丛	5.56	0.51	0.53	农村	17.35	0.97	0.01
草地	6.26	0.68	0.48	交用地	1.80	0.13	0.01
水域	0	0	0	裸地	0.001	0.001	0.05

2.2 模型原理与校验

2.2.1 模型原理

InVEST模型的产水模块是一种基于水量平衡法的估算方法,某栅格单元的降水量减去实际蒸散的水量即为产水量,单位面积产水量越多,产水服务越强,其中实际蒸散是根据ZHANG等^[30]基于Budyko水热耦合平衡假设提出的算法计算得出。模型主要算法:

$$Y_{xj} = \left(1 - \frac{AET_{xj}}{P_x} \right) \times P_x \quad (2)$$

式中: Y_{xj} 为栅格 x 中土地覆被类型 j 的年产水量, mm; AET_{xj} 为栅格 x 中土地覆被类型 j 的实际蒸散量, mm; P_x 为栅格 x 的降水量, mm。

InVEST模型中的水质净化模块用于评估生态系

统中植被和土壤的水质净化服务,主要运用植被和土壤可以通过储存和转换等方式移除或减少径流中的营养盐污染物以达到净化水质的作用的机理。该模型忽略其他污染源,只考虑非点源污染中的TN和TP,二者输出量越高,表明水质净化服务越低,其主要算法:

$$ALV_x = HSS_x \times pol_x \quad (3)$$

式中: ALV_x 是栅格 x 的调整后输出量, HSS_x 栅格 x 的水文敏感性得分, pol_x 为栅格 x 的输出系数。得到营养物质(TN、TP)输出量之后,再根据各土地利用/覆被类型对污染物的移除效率来计算得出营养物质保持(截留)量。

2.2.2 模型校验

模型校验是指将模型运行结果与实测数据进行比较,通过调整季节性因子来确定最适合于研究区域的评估模型。由于断面径流量数据不能准确反映自然径流量^[31],并且该研究涵盖的区域范围为非完整流域,因此难以采用断面数据进行校验;同时,模型产水模块的计算结果包含了地表水和地下水,因此笔者采用平均径流深与模型相应评估值进行校验。经过反复调节季节性因子取值,确定当季节性因子取值为4.22时,模型评估结果与实测值最为接近,误差为0.05%。此时,官厅水库流域的产水深为55.16 mm,产水量为 $18.85 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

3 结果与分析

3.1 产水服务时空变化

3.1.1 产水服务时间变化

1995年、2000年、2010年官厅水库流域内44个子流域的单位面积产水量如图2所示。从整体上看,官厅水库流域的产水服务呈现先减弱后增强的趋势。1995年的产水服务最强,全流域单位面积产水量为 $550.17 \text{ m}^3 / (\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,年产水量为 $18.85 \times 10^8 \text{ m}^3$,年

产水深为55.16 mm;2000年产水服务最弱,全流域单位面积产水量为 $203.54 \text{ m}^3 / (\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,年产水量为 $7.59 \times 10^8 \text{ m}^3$,年产水深为22.35 mm;2010年的产水服务相比较于2000年有所增加,全流域单位面积产水量为 $408.37 \text{ m}^3 / (\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,年产水量为 $14.33 \times 10^8 \text{ m}^3$,年产水深为40.77 mm。

同一年份内,官厅水库流域的单位面积产水量在空间上分布不均匀;不同年份间,流域单位面积产水量的分布规律表现较为一致,流域下游地区的单位面积产水量明显多于上游地区。根据统计分析(见表2),张家口市6区5县(下称张家口地区)的单位面积产水量与北京市(下称北京地区)差异较大,1995年、2000年和2010年张家口地区的单位面积产水量比北京地区相比降低38.6%、45.7%和36.6%。

1995—2010年期间北京地区和张家口地区的产水量变化率表现出较大差异。1995—2000年北京地区和张家口地区的产水量变化率分别为-57.9%和-62.8%,2000—2010年分别为78.3%和108.2%,其中张家口地区产水量变化幅度较大,但总体上北京地区的产水量下降率更高。

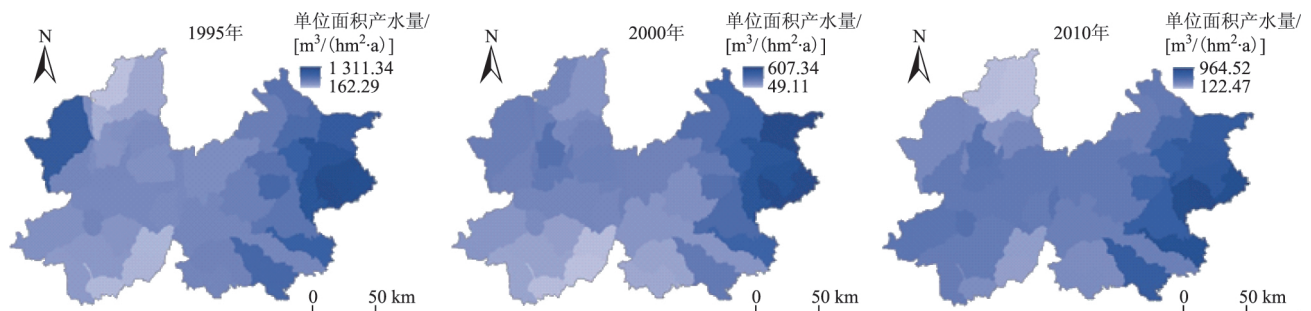


图2 1995年、2000年和2010年官厅水库流域单位面积产水量

Fig.2 Water yield per unit area of Guanting Reservoir Basin in 1995, 2000 and 2010 respectively

表2 流域内主要辖区产水量及单位面积产水量

Table 2 Water yield capacity and water yield per unit area of the main districts in the basin

区域	产水量/ 10^8 m^3			单位面积产水量/[$\text{m}^3 / (\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]		
	1995年	2000年	2010年	1995年	2000年	2010年
北京地区	11.68	4.92	8.77	660.32	281.53	497.55
张家口地区	7.17	2.67	5.56	404.53	158.21	322.56
官厅水库流域	18.85	7.59	14.33	550.17	203.54	408.37

3.1.2 产水服务空间分异

1995—2000年,官厅水库流域大多数区域的产水服务呈减弱趋势;产水服务减弱的区域占流域总面积的84.5%,流域下游地区的产水服务降幅比上游地区更大,7.6%的流域面积产水服务有所增强,产水服务保持不变的区域占流域总面积的7.9%,主要集

中在北京中心城区。2000—2010年,官厅水库流域大多数区域的产水服务有所增强;产水服务有所增强的区域占流域总面积的88.2%,增幅较大的区域主要集中在流域下游地区,9.0%的流域面积产水服务有所减弱,产水服务保持不变的区域占流域总面积的2.8%(见图3)。

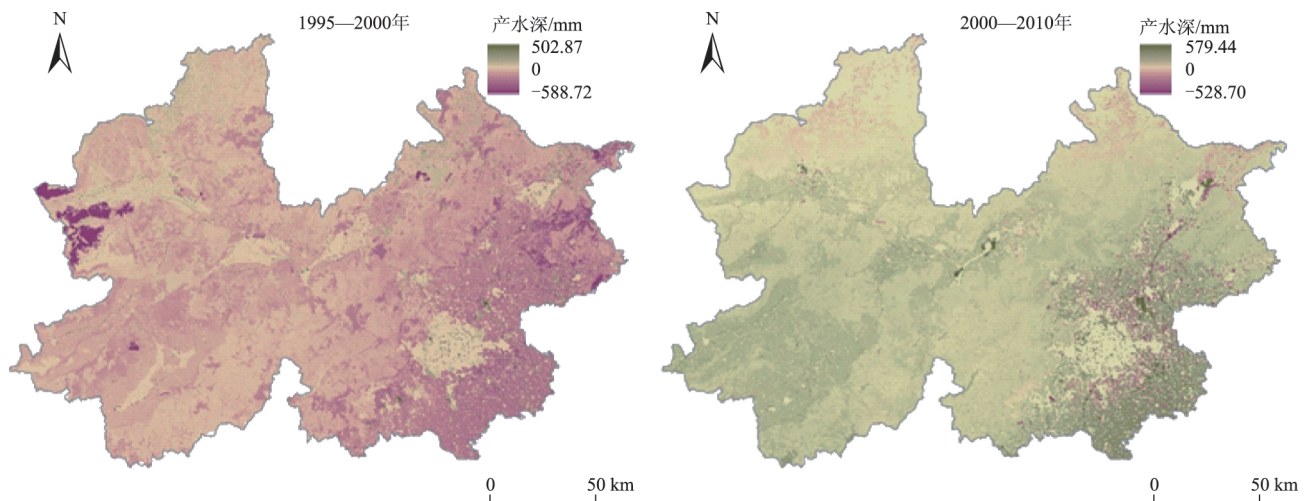


图3 1995—2010年官厅水库流域产水服务的变化

Fig. 3 Changes of water yield service in Guanting Reservoir Basin during 1995-2010

3.1.3 产水服务变化驱动因素分析

由于 InVEST 模型产水量模块是基于水量平衡法开发的模型,受降水和实际蒸散的影响较大。其中降水是气候变化的重要变量,实际蒸散则同时受气候和下垫面地表覆被的影响。气候变化通过影响降水和蒸发能力来影响产水量,土地利用变化通过改变下垫面状况来对产水量产生影响^[3,18]。该研究通过情景分析分别评估气候变化和土地利用变化对官厅水库流域产水服务的影响,深入探讨该区域产水服务时空变化的原因。设置气候不变情景和土地利用不变情景两种情景,其中气候不变情景仅假设气候状况维持在1995年不变的水平,土地利用不变情景仅假设土地利用状况维持在1995年不变的水平,然后分别对两种情景下1995年、2000年、2010年官厅水库流域的产水量进行评估。

气候不变情景下的产水量评估结果整体表现为连续下降趋势(见图4),其中2000年的评估结果与实际情况表现出显著差异,这是因为研究区域土地利用类型发生转变的缘故。1995—2000年,官厅水库流域内林地面积和水域面积分别减少了19 974和4 739 hm^2 ^[32],直接导致流域产水服务大幅下降。因此,土地利用变化是导致产水服务发生变化的一个重要原因。

土地利用不变情景下的产水量评估结果与实际情况类似(见图4)。对1995—2010年的气候变化(降水量和气温)进行分析,发现气温变化基本持平,而降水量的变化表现为倒抛物线趋势(见图5),该趋势也与土地利用不变情景下的产水量变化趋势一致。这

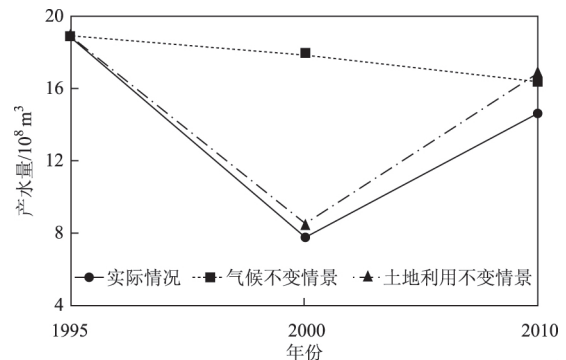


图4 不同情景下产水量变化

Fig. 4 The changes of water resource supply under different scenarios

说明气候变化也是引起产水服务发生变化的重要原因。

从空间上看,张家口市的降水量普遍低于北京市,与产水量空间分布(见图2)表现一致;在1995—2000及2000—2010年,北京市降水量的降幅和增幅均明显大于张家口市,分别与官厅水库流域1995—2000及2000—2010年的产水量变化情况(见图3)对应,北京市在这两年内的产水量降幅和增幅均大于张家口市。这也进一步证实了气候变化(降水量)是引起产水服务变化的重要原因。

3.2 水质净化服务时空变化

3.2.1 TN、TP输出空间分异

流域内各子流域单位面积TN、TP输出量分布存在一定的空间分异。单位面积TN、TP输出量最大值分别为2.55和0.24 kg/hm^2 ,二者均出现在1995年;

单位面积 TN、TP 输出量最小值分别为 0.27 和 0.03 kg/hm², 其中单位面积 TN 输出量最小值出现在 2010 年, 而单位面积 TP 输出量最小值在 1995 年、2000 年和 2010 年表现一致(见图 6)。

从空间上看, 单位面积 TN、TP 输出量较高的子

流域主要集中在北京地区东南部和张家口地区西南部, 这些区域往往有着较低的植被覆盖度; 单位面积 TN、TP 输出量较低的子流域主要集中在北京地区北部和张家口地区东南部, 这些区域的植被覆盖度普遍较高。

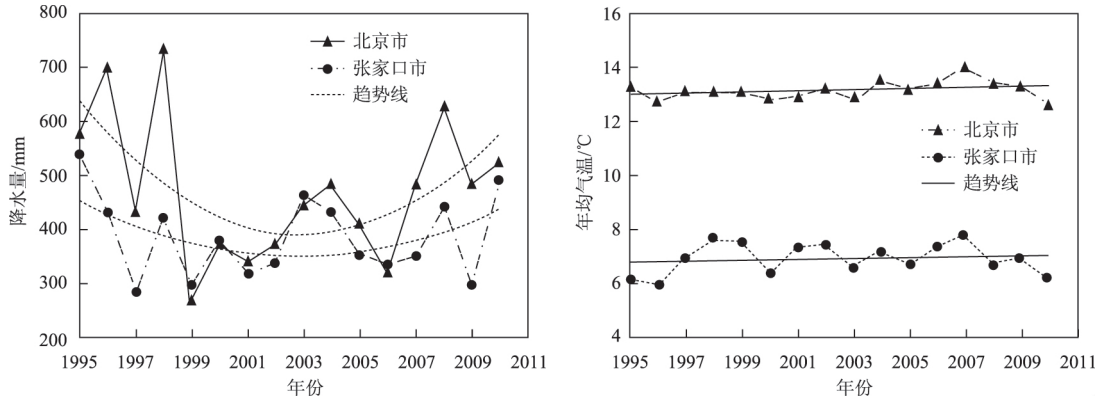


图5 1995—2000 年降水量和气温变化

Fig. 5 The changes of precipitation and temperature during 1995–2010

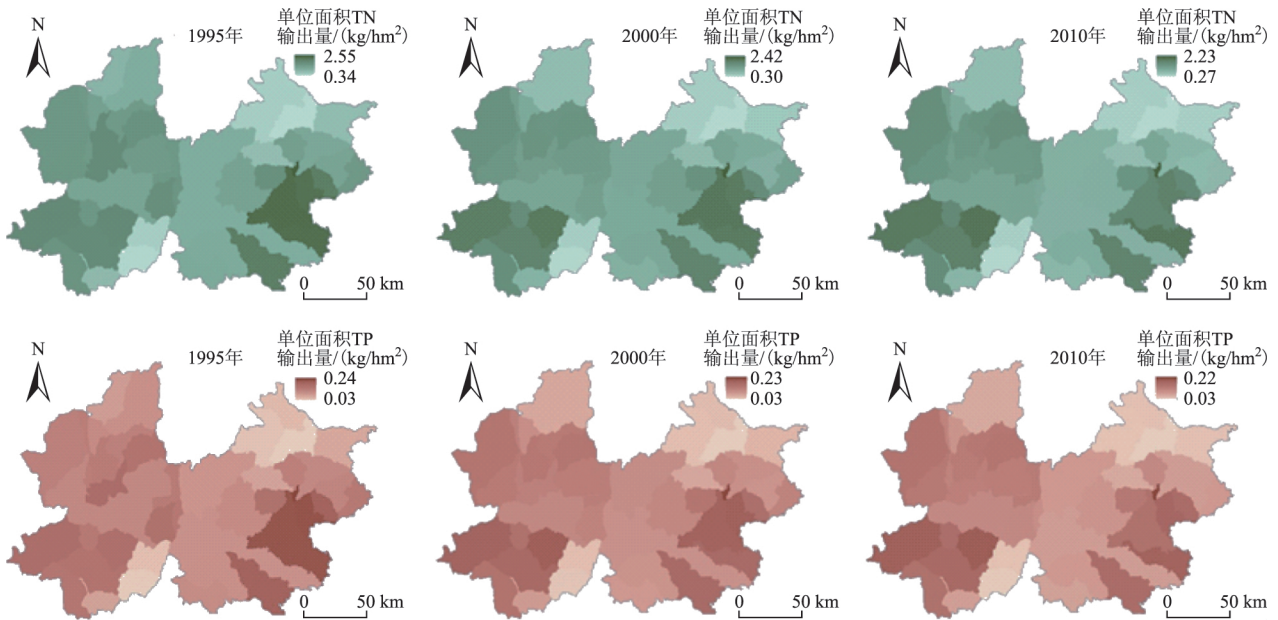


图6 1995 年、2000 年、2010 年官厅水库流域单位面积 TN、TP 输出量

Fig. 6 TN and TP outputs of Guanting Reservoir Basin in 1995, 2000 and 2010 respectively

从时间上看, 不同年份间多数区域的 TN、TP 输出量基本保持不变. 1995—2000 年 TN、TP 输出量保持不变的面积分别占流域总面积的 81.5% 和 90.3%; 2000—2010 年分别占 86.9% 和 95.2% (见表 3). 不同年份间 TN、TP 输出量增加或减少的区域随机分布在流域各处, 没有主要集中区域。

表3 TN、TP 输出量变化面积占比

Table 3 The changes in the area percentage of TN and TP outputs

变化趋势	TN 输出量变化面积占比/%		TP 输出量变化面积占比/%	
	1995—2000 年	2000—2010 年	1995—2000 年	2000—2010 年
减少	9.0	7.1	4.6	3.0
不变	81.5	86.9	90.3	95.2
增加	9.5	6.0	5.1	1.8

3.2.2 水质净化服务时间变化

1995—2010年,官厅水库流域的TN、TP输出量呈先增加后减少趋势,其中1995—2000年TN、TP输出量分别增加了2.7%和5.8%,2000—2010年分别减少了12.7%和11.9%。15 a间官厅水库流域的TN、TP输出量均有所减少,分别减少了10.4%和6.8%。

北京地区和张家口地区的TN、TP输出量在1995—2010年也几乎呈下降趋势,但北京地区的下降程度明显大于张家口地区。15 a间北京地区的TN

输出量下降了18.2%、TP输出量下降了17.7%,张家口地区的TN输出量下降了3.0%、而TP输出量增长了3.8%(见表4)。

总的来说,1995—2010年官厅水库流域的水质净化服务呈现不断增强的趋势,15 a间该流域对TN的净化服务增强了10.4%,对TP的净化服务增强了6.8%。北京地区的氮、磷净化服务均有一定程度增强,张家口地区的氮净化服务略有增强,而磷净化服务略有减弱。

表4 流域内主要辖区TN、TP输出量

Table 4 The outputs amounts for TN and TP in the main district of the basin

区域	TN 输出量/t			TP 输出量/t		
	1995年	2000年	2010年	1995年	2000年	2010年
北京地区	1 945.6	1 960.4	1 591.1	187.3	198.2	154.2
张家口地区	2 083.1	2 177.5	2 020.3	192.4	203.6	199.8
官厅水库流域	4 028.7	4 137.9	3 611.4	379.7	401.8	354.0

3.2.3 水质净化服务影响因素探讨

InVEST模型的水质净化模块主要评估植被和土壤对TN、TP的截留效用,因此植被覆盖、土壤类型等都是影响水质净化服务的重要因素。从空间上看,官厅水库流域水质净化服务较弱的区域主要集中在平原地区(见图6),这些区域的植被覆盖度更低,对污染物的截留效用减弱;同时这些区域的城市化程度更高,更加频繁的人类活动也导致污染物排放的增加,从而导致水质净化服务的减弱。

因此由于人类活动引起的植被覆盖变化或污染物排放变化也会水质净化服务产生影响,这一点在官厅水库的发展历程及政策变化中也有所体现:1995—2000年,官厅水库的富营养化问题日益突出,氮、磷污染成为这一时期的主要污染^[33],这直接导致官厅水库于1997年退出北京市饮用水供应系统,从而在该时期内官厅水库流域的氮、磷输出量均有所增加;2000—2010年,随着《21世纪初期(2000—2005年)首都水资源可持续利用规划》《海河流域水污染防治规划(2006—2010年)》等一系列规划的颁布实施,官厅水库水质有了明显改善,从而这段时期内官厅水库流域的氮、磷输出量均明显减少,水质净化服务得到恢复并有所增强。这也充分说明这些水资源相关规划和政策切实改善了官厅水库流域的水环境,可以为官厅水库的水资源管理提供有力依据和重要参考。

从研究区域的行政区划上来看,2000—2010年,北京地区产水服务和水质净化服务的增强程度均明

显大于张家口地区,而这段时间内张家口地区作为北京地区上游为保护官厅水库采取了多项环境保护和污染治理措施^[34]。二者之间是否存在联系值得进一步研究,研究结果或可为官厅水库流域的环境政策研究提供参考。

4 结论

a) 1995年、2000年、2010年官厅水库流域的产水服务呈现先减弱后增强的趋势,其年产水量分别为 18.85×10^8 、 7.59×10^8 、 $14.33 \times 10^8 \text{ m}^3$,整体呈减弱趋势,15 a来产水服务减弱24.0%。

b) 官厅水库流域内各子流域的产水服务表现出显著的空间异质性,下游北京地区的产水服务明显强于上游张家口地区,并以张家口地区产水服务的变幅较大。

c) 1995年、2000年和2010年官厅水库流域的水质净化服务呈现先减弱后增强的趋势,其中TN输出量分别为4 028.7、4 137.9、3 611.4 t,TP输出量分别为379.7、401.8、354.0 t。15 a间官厅水库流域对TN的净化服务增强了10.4%,对TP的净化服务增强了6.8%。

d) 1995—2010年北京地区的水质净化服务增强幅度明显大于张家口地区,其中北京地区的氮、磷净化服务分别增强了18.2%和17.7%,张家口地区的氮净化服务略有增强,增强幅度为3.0%,而磷净化服务出现衰退,减弱了3.8%。

参考文献(References):

[1] JANSSON N K, LEVIN S, LUBCHENCO J, et al. The value of

- nature and the nature of value [J]. *Science* ,2000 ,289 (5478) : 395-396.
- [2] 谢高地 张彩霞 张昌顺 等. 中国生态系统服务的价值 [J]. *资源科学* 2015 37(9) : 1740-1746.
XIE Gaodi ZHANG Caixia ZHANG Changshun *et al.* The value of ecosystem services of China [J]. *Resource Science* 2015 37(9) : 1740-1746.
- [3] TERRADO M ,ACUÑA V ,ENNAANAY D *et al.* Impact of climate extremes on hydrological ecosystem services in a heavily humanized Mediterranean Basin [J]. *Ecological Indicators* ,2014 ,37 (1) : 199-209.
- [4] BRAUMAN K A ,DAILY G C ,DUARTE T K *et al.* The nature and value of ecosystem services: an overview highlighting hydrologic services [J]. *Social Science Electronic Publishing* ,2007 ,32: 67-98.
- [5] DE GROOT R S ,ALKEMADE R ,BRAAT L ,*et al.* 2010. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning ,management and decision making [J]. *Ecological Complexity* 2010 7(3) : 260-272.
- [6] COSTANZA R ,D'ARCE R ,DE GROOT R *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Nature* ,1997 ,387: 253-260.
- [7] 欧阳志云 王效科 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究 [J]. *生态学报* ,1999 ,19(5) : 607-613.
OUYANG Zhiyun ,WANG Xiaoke MIAO Hong. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and ecological-economic values [J]. *Acta Ecologica Sinica* ,1999 ,19(5) : 607-613.
- [8] 鲁春霞 谢高地 肖玉 等. 青藏高原生态系统服务功能的价值评估 [J]. *生态学报* 2004 24(12) : 2749-2755.
LU Chunxia XIE Gaodi XIAO Yu *et al.* Ecosystem diversity and economic valuation of Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica* 2004 24(12) : 2749-2755.
- [9] TROY A ,WILSON M A. Mapping ecosystem services: practical challenges and opportunities in linking GIS and value transfer [J]. *Ecological Economics* 2006 60(2) : 435-449.
- [10] YOSHIDA A ,CHANHDA H ,YE Y M ,*et al.* Ecosystem service values and land use change in the opium poppy cultivation region in Northern Part of Lao PDR [J]. *Acta Ecologica Sinica* ,2010 ,30 (2) : 56-61.
- [11] GRÊT-REGAMEY A ,BEBI P ,BISHOP I D ,*et al.* Linking GIS-based models to value ecosystem services in an alpine region [J]. *Journal of Environmental Management* 2008 89(3) : 197-208.
- [12] 马良 金陶陶 文一惠 等. InVEST 模型研究进展 [J]. *生态经济* 2015 31(10) : 126-131.
MA Liang JIN Taotao WEN Yihui *et al.* The research progress of InVEST model [J]. *Ecological Economy* 2015 31(10) : 126-131.
- [13] NELSON E ,MENDOZA G ,REGETZ J ,*et al.* Modeling multiple ecosystem services , biodiversity conservation , commodity production ,and tradeoffs at landscape scales [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment* 2009 7(1) : 4-11.
- [14] LEH M D K ,MATLOCK M D ,CUMMINGS E C *et al.* Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment* ,2013 ,165 (1751) : 6-18.
- [15] GOLDSTEIN J H ,CALDARONE G ,DUARTE T K ,*et al.* Integrating ecosystem-service tradeoffs into land-use decisions [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 2012 ,109(19) : 7565-7570.
- [16] HAUNREITER E ,CAMERON D. Mapping ecosystem services in the Sierra Nevada ,CA [J]. *The Nature Conservancy ,California Program* 2001 ,12(1) : 16-32.
- [17] ZHANG Canqiang ,LI Wenhua ,ZHANG Biao *et al.* Water yield of Xitiaoxi River Basin based on INVEST modeling [J]. *Journal of Resources and Ecology* 2012 3(1) : 50-54.
- [18] 潘韬 吴绍洪 戴尔阜 等. 基于 InVEST 模型的三江源区生态系统产水服务时空变化 [J]. *应用生态学报* ,2013 ,24(1) : 183-189.
PAN Tao ,WU Shaohong ,DAI Erfu *et al.* Spatiotemporal variation of water source supply service in Three Rivers Source Area of China based on InVEST model [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* , 2013 24(1) : 183-189.
- [19] 白杨 郑华 庄长伟 等. 白洋淀流域生态系统服务评估及其调控 [J]. *生态学报* 2013 33(3) : 711-717.
BAI Yang ,ZHENG Hua ,ZHUANG Changwei ,*et al.* Ecosystem services valuation and its regulation in Baiyangdian Basin: based on InVEST model [J]. *Acta Ecologica Sinica* 2013 33(3) : 711-717.
- [20] 郝芳华 孙峰 张建永. 官厅水库流域非点源污染研究进展 [J]. *地学前缘* 2002 9(2) : 385-386.
HAO Fanghua ,SUN Feng ZHANG Jianyong. A research process of non-point pollution in Guanting Reservoir Basin [J]. *Earth Science Frontiers* 2002 9(2) : 385-386.
- [21] 万译文 康天放 周忠亮 等. 北京官厅水库水体中挥发性有机物健康风险评估 [J]. *环境科学研究* 2009 22(2) : 150-154.
WANG Yiwon ,KANG Tianfang ,ZHOU Zhongliang ,*et al.* Health risk assessment of volatile organic compounds in water of Beijing Guanting Reservoir [J]. *Research of Environmental Sciences* , 2009 22(2) : 150-154.
- [22] 梁涛 王浩 丁士明 等. 官厅水库近三十年的水质演变时序特征 [J]. *地理科学进展* 2011 22(1) : 38-44.
LIANG Tao ,WANG Hao ,DING Shiming ,*et al.* An evolution of water quality in Guanting Reservoir during the past three decades [J]. *Progress in Geography* 2011 22(1) : 38-44.
- [23] 胡庆芳 杨大文 王银堂 等. Hargreaves 公式的全局校正及适用性评价 [J]. *水科学进展* 2011 22(2) : 160-167.
HU Qingfang ,YANG Dawen ,WANG Yintang ,*et al.* Global calibration of Hargreaves equation and its applicability in China [J]. *Advances in Water Science* 2011 22(2) : 160-167.
- [24] DROOGERS P , ALLEN R G. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions [J]. *Irrigation and drainage systems* 2002 16(1) : 33-45.
- [25] ZHOU Wenzuo ,LIU Gaohuan ,PAN Jianjun ,*et al.* Distribution of available soil water capacity in China [J]. *Journal of Geographical*

- Sciences 2005 ,15(1) :3-12.
- [26] ALLEN R G , PEREIRA L S , RAES D , *et al.* Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements irrigation and drainage paper[M]. Rome: FAO ,1998:290-300.
- [27] 张微微 ,李红 ,孙丹峰 ,等. 怀柔水库上游农业氮磷污染负荷变化[J]. 农业工程学报 2013 ,29(24) :124-131.
ZHANG Weiwei ,LI Hong ,SUN Danfeng ,*et al.* Pollution loads variation of agricultural source in upstream of Huairou Reservoir [J]. Transactions of the CSAE 2013 29(24) :124-131.
- [28] 刘亚琼 ,杨玉林 ,李法虎. 基于输出系数模型的北京地区农业面源污染负荷估算[J]. 农业工程学报 2011 27(7) :7-12.
LIU Yaqiong ,YANG Yulin ,LI Fahu. Estimation of pollution loads from agricultural nonpoint sources in Beijing region based on export coefficient model approach [J]. Transactions of the CSAE 2011 27(7) :7-12.
- [29] 王晓燕 ,王一岫 ,王晓峰 ,等. 密云水库小流域土地利用方式与氮磷流失规律[J]. 环境科学研究 2003 ,16(1) :30-33.
WANG Xiaoyan ,WANG Yixun ,WANG Xiaofeng ,*et al.* The character of nutrient loss and land use in a small watershed of Miyun Reservoir [J]. Research of Environmental Sciences 2003 ,16(1) :30-33.
- [30] ZHANG L ,DAWES W R ,WALKER G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale [J]. Water Resources Research 2001 37(3) :701-708.
- [31] KARNIELI A ,BEN-ASHER J. A daily runoff simulation in semi-arid watersheds based on soil water deficit calculations [J]. Journal of Hydrology ,1993 ,149(1/2/3/4) :9-25.
- [32] 刘桂环 ,文一惠 ,张惠远. 基于生态系统服务的官厅水库流域生态补偿机制研究[J]. 资源科学 2010 32(5) :856-863.
LIU Guihuan ,WEN Yihui ,ZHANG Huiyuan. A study on ecological compensation for the Guanting Reservoir based on ecosystem services [J]. Resource Science 2010 32(5) :856-863.
- [33] 梁涛 ,张秀梅 ,章申. 官厅水库及永定河枯水期水体氮、磷和重金属含量分布规律[J]. 地理科学进展 2011 20(4) :341-346.
LIANG Tao ,ZHANG Xiumei ,ZHANG Shen. The study of distribution of N ,P and heavy metals in Guanting Reservoir and Yongdinghe River [J]. Progress in Geography ,2011 ,20(4) :341-346.
- [34] 李宾芳. 张家口成为北京重要水源地 [N]. 中国信息报 2013-09-26(4) .