

策勒绿洲生态与灌溉用水对地下水埋深的影响

钱剑平¹, 赵建平¹, 桂东伟², 冯新龙¹

(1. 新疆大学 数学与系统科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830046; 2. 中国科学院

新疆生态与地理研究所, 新疆策勒荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: [目的] 估测地下水资源变化动态并对其安全性进行识别, 为策勒绿洲水资源管理及维护绿洲生态安全提供一定决策依据。[方法] 分析策勒绿洲总用水需求, 基于策勒河径流与地下水动态监测数据, 计算绿洲用水缺口; 最后, 通过绿洲长期地下水位监测资料分析地下水位随时间变化规律。[结果] 综合考虑生态用水背景下, 策勒绿洲年均用水缺口 $5.20 \times 10^6 \sim 1.15 \times 10^7 \text{ m}^3$, 当利用策勒绿洲地下水补足绿洲用水差额时, 地下水平均埋深年均下降 $0.27 \sim 0.60 \text{ m}$, 在非枯水年状态下策勒绿洲地下水补给相对充足使得地下水平均水位无明显变化, 只在地下水水位时空分布上有所改变, 如 2008—2014 年绿洲地下水平均埋深虽有较大幅度波动, 但基本维持在 21 m 上下。[结论] 短期来看策勒绿洲地下水埋深变化处于安全范围内, 但为了保证绿洲健康可持续发展, 并维持地下水埋深的稳定, 当前应投入财力到水资源使用的监督和管理中去, 将建设农业节水设施作为长期发展策略。

关键词: 生态需水量; 农业需水量; 地下水埋深; Thiessen 多边形法; 策勒绿洲

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)01-0096-07

中图分类号: S274

文献参数: 钱剑平, 赵建平, 桂东伟, 等. 策勒绿洲生态与灌溉用水对地下水埋深的影响[J]. 水土保持通报, 2018, 38(1): 96-102. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.01.016. Qian Jianping, Zhao Jianping, Gui Dongwei, et al. Effects of ecological water use and irrigation on groundwater depth in Cele Oasis[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(1): 96-102.

Effects of Ecological Water Use and Irrigation on Groundwater Depth in Cele Oasis

QIAN Jianping¹, ZHAO Jianping¹, GUI Dongwei², FENG Xinlong¹

(1. College of Mathematics and System Sciences, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046,

China; 2. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Cele National Station of Observation and Research for Desert-Grassland Ecosystem, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: [Objective] Estimating the dynamic changes of groundwater resource changes and identifying possible safety measures, we aim to provide decision basis of managing available water resources and maintaining the ecological security of oasis. [Methods] Firstly, the total water demand of Cele Oasis was analyzed, and then the deficiency of water in oasis was calculated according to monitoring data on river and groundwater dynamics. Finally, the dynamic changes in groundwater level were analyzed using long-term monitoring data of groundwater. [Results] Results revealed that when considering the ecological water use, the average annual water gap in the Cele Oasis was $5.20 \times 10^6 \sim 1.15 \times 10^7 \text{ m}^3$. On average, the annual decline in groundwater depth was varying from 0.27 m to 0.60 m due to continuous use of groundwater in Cele Oasis. During high flow years, the groundwater recharge was relatively abundant that did not make any obvious change in average depth of groundwater level except in its spatial distribution. During 2008—2014, the groundwater average depth showed more substantial fluctuations, but it basically maintained at the level of 21 m depth. [Conclusion] The change in groundwater depth in Cele Oasis is within safe range. But, in order to ensure healthy and sustainable development of the oasis, and to maintain the stability of groundwater depth, the

收稿日期: 2017-04-29

修回日期: 2017-07-17

资助项目: 中国科学院特色所项目“新疆典型地区地下水安全及生态屏障建设技术研发与示范”(TSS-2015-014-FW-5-3); 国家自然科学基金项目“绿洲水资源管理”(U1603343), “绿洲适宜规模的不确定性研究”(41471031); 新疆自治区科技支撑计划项目“塔克拉玛干沙漠南缘骆驼刺植被修复技术研发与示范”(201433114)

第一作者: 钱剑平(1991—), 男(汉族), 新疆维吾尔自治区伊宁市人, 硕士研究生, 研究方向为绿洲水资源优化配置。E-mail: 1433479033@qq.com。

通讯作者: 桂东伟(1977—), 男(汉族), 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市, 博士, 研究员, 主要从事荒漠环境与绿洲生态工作。E-mail: guidwei@163i.com。

current financial resources should be invested in water resources supervision and management. Besides, the construction of agricultural water-saving facilities should be viewed as a long-term development strategy.

Keywords: ecological water demand; agricultural water demand; groundwater depth; Thiessen polygon method; Cele Oasis

绿洲是干旱区重要的生态系统,有着独特的人地关系和自然景观。新疆和甘肃境内的绿洲是学者研究的主要区域,重点研究焦点放在绿洲的水土资源合理配置、生态需水量、绿洲农业发展、生态环境建设、城镇发展特点和生态经济系统等方面^[1-9]。由于水资源是绿洲发展最重要的限制因子,直接决定绿洲的存在与发展,决定了在研究绿洲问题时始终避不开对绿洲水资源的讨论。近些年来,绿洲地区经济有较快的发展与转型,这都是以大规模土地开发利用和超负荷的地下水开采为代价支撑的发展模式^[10]。随着地下水的开采规模变大,地下水水位的下降速度也在加快,使得地区发展面临巨大困难与挑战。因此,针对当前严峻的用水态势,开展相应的绿洲用水需求与地下水埋深变化的研究有着迫切的现实需要,对绿洲的生态安全与可持续发展有着重要的意义。

绿洲地下水资源受到人类活动与自然条件的共同影响,灌溉用水及地表来水是影响地下水埋深动态变化的主要因子^[11-12]。近年来有许多围绕地下水埋深动态变化及其影响因素的研究工作,诸多成熟的数理统计方法已被广泛地运用于研究中,诸如回归分析、因子分析、主成分分析、层次分析、Mann-Kendall 趋势分析及神经网络模型^[13-20]等。其中回归分析应用最多,然而此方法在使用中存在诸多弱点:要求数据必须是典型分布且样本规模要大;计算繁杂;易出现正负相关颠倒。为克服回归分析的不足和弊病,也有研究利用灰色关联分析方法探究主成分分析确定下的影响地下水埋深动态变化主要驱动因子的敏感程度^[21],将这 2 种方法结合运用到地下水埋深动态评价中去。需要说明的是,地下水埋深是地下水资源量变化最直接的表现,因此,以上研究均期望找到影响地下水埋深动态变化的影响因素及其之间的线性关系。预测地下水埋深动态变化时,只需预测各影响因素未来变化趋势即可。描述一个区域地下水水位埋深现状时,人们希望以一个平均埋深来反应该地区的地下水水位状态^[22]。目前计算区域平均值的方法很多,常用的有等值线法、算术平均法、泰森多边形法等,泰森多边形法最适合区域内数值分布不均的情况,是中国计算区域平均降雨量的常用方法,并广泛应用于水利、气象、环境等学科^[23-25]。影响地下水埋深动态变化的因素是多方面的,它不仅受人为因素的影响也受自然气候条件的影响。以上对地下水动态

变化的研究适用于区域较大、影响因素偏多的区域,对于物质循环较为封闭的小型绿洲区域便不再适用。原因是区域内影响埋深的因素之间相关性较强,使得构建的模型误差变大,对于这样情况只需考虑区域内水资源使用的盈亏关系,便能准确分析影响地下水埋深动态变化的关键因素。

本研究拟以此为出发点,选取塔里木盆地南缘中部的策勒绿洲为典型研究区,依托策勒荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站(下简称策勒站)长期监测资料。从绿洲用水总需求量的角度出发,考虑策勒绿洲扇形区域生态和农业需水总量与绿洲水资源补给量之间的盈亏关系,得到在绿洲用水需求影响下的地下水埋深动态变化。利用策勒站提供策勒绿洲扇形绿洲区 25 口地下水固定观测井数据并借助 ArcGIS 10.1 模拟出绿洲地下水埋深等水位线图,观测地下水埋深动态变化,验证绿洲满足生态与灌溉用水对地下水埋深影响关系,分析绿洲地下水利用与恢复是否合理,最终为绿洲管理者在制定绿洲长期发展策略时提供依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

塔里木盆地位于中国西北部的新疆,是世界上最大的内陆盆地。塔里木盆地南缘分布着数量众多的绿洲,虽然绿洲的大小不一,但是有着相似的结构和特点^[26],因此,可以选取典型的绿洲作为研究塔里木盆地南缘绿洲用水需求对地下水埋深影响的典型。本研究把地处新疆塔里木盆地南缘的策勒绿洲扇形绿洲区(以下简称策勒绿洲),作为绿洲生态与灌溉用水需求对地下水埋深影响的典型研究区。

策勒绿洲位于策勒河下游(地理坐标 36°54′—37°09′N,80°37′—80°59′E),隶属于新疆和田地区策勒县,绿洲主体部分加外围荒漠植被过渡带总面积 274.64 km²^[27]。策勒绿洲地处昆仑山北麓中段,总体地势南高北低,海拔高度为 1 296.5~1 370.5 m。区域内年均气温 11.9℃,全年干燥少雨,降水量不到 40 mm 而年均蒸发量达 2 700 mm,年均蒸发量数据来自 1960—2010 年策勒站使用直径 20 cm 的蒸发皿对此地的实际测量^[28]。维系策勒绿洲生存与发展的水源只依靠一条起源于昆仑山脉的策勒河,1960—2015 年策勒河年均径流量为 1.28×10⁸ m³。

1.2 数据来源

策勒绿洲由 4 种生态景观类型组成,包括沙漠植被生态景观、防风林景观、农田景观和河岸生态景观。根据 2010 年提供的 LandsatTM 遥感卫星图像解析数据,得到策勒绿洲外围沙漠植被景观的面积数据。图像的比例尺为 1:47 000,根据图像对策勒绿洲地表植被类型进行鉴别,结果得到策勒绿洲河岸林与防风林面积为 50 km² (主要树种为胡杨树),绿洲荒漠植被高覆盖率草地 69.34 km² (植被覆盖率 60%~90%),中等覆盖率草地 22.54 km² (植被覆盖率 20%~60%) 和低覆盖率草地 20.28 km² (植被覆盖率 5%~20%)^[29] (表 1)。关于遥感卫星图像解析数据的精确度,在 2010 年分类数据表明系数接近 93%^[30]。因此,利用遥感卫星图像的解析数据鉴别研究区地表植被覆盖类型,能够准确反映研究区域内地表植被的覆盖类型。

表 1 维持不同覆盖率草地在高、中、低 3 种水平下需要的需水面积

植被覆盖率	总面积/ km ²	需水面积/km ²		
		高	中	低
高覆盖率草地(盖度 60%~90%)	69.34	62.41	52.01	41.60
中等覆盖率草地(盖度 20%~60%)	22.54	13.52	9.02	4.51
低覆盖率草地(盖度 5%~20%)	20.28	4.06	2.54	1.01

Xue 等^[31]在早期对策勒绿洲生态需水量做过详细的研究,绿洲生态需水量在此分为绿洲自然景观需水量和绿洲河岸生态需水量两大部分,并估算出维持绿洲自然景观和河岸生态所需生态需水量。文章中把维持河岸生态所需生态需水量细分为 3 类,包括维持河流流动性、河流内清淤输沙与河道自然蒸散所需生态需水量。考虑 1960—1980 年这段时期策勒绿洲河岸环境维持着较好的自然生态,期间还没有开始修建水库且没有出现水资源的过度开采,故而受到人为因素影响较小,因此,使用这段时期水文数据进行估算维持河岸生态系统各项生态功能的需水量。维持绿洲河岸生态稳定的 3 类生态需水量结果分别是 1.60×10⁶,1.40×10⁶ 和 3.40×10⁶ m³。以往研究中对塔里木河下游绿色走廊地区自然景观需水配额

进行过详细的讨论,估计出荒漠植被草地在高、中、低 3 种水平及河岸林与防风林在此地区的需水配额^[32]。因此,荒漠植被的 3 种覆盖率草地分别在高、中、低 3 种水平下所需生态需水量分别为 1.69×10⁷,1.37×10⁷ 和 1.05×10⁷ m³。此外,河岸林和防风林所需的生态需水量为 1.70×10⁷ m³ (表 2)。

表 2 策勒绿洲不同自然景观植被生态需水量配额

自然植被类型	需水配额/ (m ³ ·hm ⁻²)	需水量/10 ⁸ m ³		
		高	中	低
高覆盖率草地	2 343.8	0.146	0.122	0.098
中覆盖率草地	1 486.7	0.020	0.013	0.007
低覆盖率草地	629.7	0.003	0.002	0.001
河岸林和防风林	3 405.0	0.170	0.170	0.170
总计	—	0.339	0.307	0.276

策勒绿洲自然景观植被需水量受绿洲外围荒漠草地植被长势影响,因此,绿洲外围荒漠植被在高、中、低 3 种需水水平下,绿洲自然景观植被与河岸生态所需生态需水量总量分别为 3.89×10⁷,3.57×10⁷ 和 3.26×10⁷ m³,它们分别占到策勒河年均径流量的 30.4%,27.9% 和 25.5%。

基于统计年鉴及策勒站提供资料,策勒绿洲扇形区域农作物灌溉面积约为 8 667 hm²。当前绿洲扇形区域内主要种植石榴、红枣和核桃这几类经济林作物,这几类作物占到绿洲农作物种植面积的近 8 成,除绿洲内部种植小麦、玉米等作物外,也在经济林作物中套种少量小麦、玉米等作物,在绿洲东北边缘地下水埋深较浅处也种植有部分棉花^[33]。为方便统计与计算不同农业景观种植面积,这里只考虑策勒绿洲种植石榴、红枣和核桃的面积,并把其他作物种植面积按石榴、红枣、核桃的种植面积比例全部转化为 3 类经济林作物。这 3 种经济林作物的单位面积年均灌水量区间分别为 [12.8,14.3]×10³, [10.0,11.4]×10³ 和 [10.2,11.2]×10³ m³/hm²。表 3 给出把绿洲其他农作物按 3 种主要经济林作物的种植面积比例转化为石榴、红枣和核桃的种植面积,此后研究只考虑其他作物转化成这 3 类作物后的需水量。

表 3 绿洲各经济林种植面积及单位面积灌溉用水量

作物类型	石榴	红枣	核桃
实际面积/hm ²	1 041.7	3 347.6	2 315.4
按比例转化后面积/hm ²	1 246.8	4 327.5	2 992.7
单位面积年均灌水量/(10 ³ m ³ ·hm ⁻²)	[12.8,14.3]	[10.0,11.4]	[10.2,11.2]

注:灌区经济林作物种植面积及作物灌水量资料由策勒站提供。

策勒绿洲地下水资源主要是由策勒河自昆仑山北麓流经至策勒绿洲过程中在山区逐步形成,而在绿

洲盆地和平原内进行开发利用。近年策勒绿洲人工开垦的耕地面积不断扩大,导致绿洲用水需求变大,

开采地下水资源成为常态^[34]。绿洲的地下水埋深近年来下降得非常明显,并且没有减缓的趋势,但这种发展策略必定不能长久。由于策勒绿洲的气候条件地区内常年降水量稀少,因此鲜有上层滞水;再者,目前策勒绿洲地下水埋深基本不超过 70 m,故策勒绿洲使用的地下水类型主要是潜水。因此,下文中提及的策勒绿洲地下水,本文统一考虑成潜水。地下水埋深数据来自策勒站在策勒绿洲建立的长期固定 25 口地下水观测井位数据,以此数据为出发点监测绿洲用水状况。

2 研究方法

地下水平均埋深使用 Thiessen 多边形法进行计算,其基本思想是每个样点上的地下水埋深并不只代表该点的地下水埋深,而是更多地反应它周围区域的地下水埋深,每个点代表的区域一般不是规则的多边形^[35]。具体步骤为:①将区域井位点的位置进行连线,形成三角网;②对每个三角形各边做垂直平分线;③选取每个井位点周围的垂直平分线,构成以这个点为核心的多边形。则地下水平均埋深的数学表达式如下:

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n z_i a_i / \sum_{i=1}^n a_i}{\sum_{i=1}^n z_i a_i / A} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i z_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (1)$$

式中: z ——绿洲区地下水平均埋深(m); a_i ——第 i 个井位点周围的多变形面积(m^2); z_i ——第 i 个井位点的地下水埋深(m); A ——绿洲面积(m^2); ω_i ——面积权重; z_i ——第 i 个井位点的地下水埋深(m)。

策勒绿洲使用的地下水类型主要是潜水,于是潜水含水层的储水量数学表达式为:

$$W = \mu \cdot V = \mu \cdot S \cdot h \quad (2)$$

式中: W ——地下水的储藏量(m^3); V ——潜水含水层的体积(m^3); μ ——潜水含水层给水度; S ——研究区面积(m^2); h ——潜水含水层厚度或下降高度(m)。根据策勒绿洲地下岩层结构及埋深状况,潜水含水层给水度取值设定为 0.07^[36]。

3 结果与分析

3.1 策勒绿洲农业需水量

策勒绿洲内农业灌溉用水依赖于引水灌溉,大部分农田灌区是直接抽取地下水灌入水渠对目标农田进行灌溉。当前策勒绿洲的总用水需求大于绿洲水资源补给量,从用水管理策略的角度考虑,应在枯水期或枯水年限制经济效益小的作物的用水量,保证区

域地下水埋深不会在短期内剧烈变化。但从绿洲实际情况考虑,在灌溉用抽水井处并没有限制抽水量,而农民不会接受因为限制作物灌水量而造成自身的经济损失,因此当前策勒绿洲均是对农田进行充分灌溉,并且绿洲绝大部分农田依靠漫灌方式对农作物进行浇灌。因此,策勒绿洲主要经济林作物实际年均灌水量会高于策勒站实验样地得出的最优灌水量,故各类经济林作物均是给予其最大灌水量保证其最优的效益产出。于是石榴、红枣、核桃这 3 类经济林作物单位面积年均灌水量取值设定为 1.43×10^4 , 1.14×10^4 , 和 $1.12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 通过计算估计出石榴、红枣和核桃每年灌水量分别为 1.78×10^7 , 4.93×10^7 和 $3.35 \times 10^7 \text{ m}^3$, 策勒绿洲每年农业用水总需求为 $1.01 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。根据策勒站提供当地农副产品价格资料,知 3 类特色果林作物单位面积收益为 5.245×10^4 , 5.025×10^4 和 $4.71 \times 10^4 \text{ 元}/\text{hm}^2$, 由此可看出种植红枣能获得的收益更多,并且给予的灌水量相对较少。这也是策勒绿洲扇形区域内红枣的种植面积占果林面积大部分份额的原因,但考虑到绿洲区域种植结构比较单一,使绿洲经济受作物价格变化影响较大和抗风险能力偏低。这也是红枣虽有这些优势的情况下,红枣的种植面积还控制在 3347.6 hm^2 , 占林果类作物面积的 48.8%。

3.2 策勒绿洲地下水位变化趋势

策勒绿洲位于昆仑山北麓,总体地势南高北低,西南向东北倾斜,顺着策勒河延伸至塔克拉玛干沙漠南部边缘地区,这种南北地势的差异是造成策勒绿洲地下水分布呈现南深北浅特点的主要原因。南部一带海拔是整个绿洲最高的区域,因此地下水埋深普遍比其他区域要深,北部与东部地势较低,地下水流向该区域,使得东北位置地下水埋深较浅。基于策勒站在策勒绿洲建立的长期固定 25 口地下水观测井位的数据,可知绿洲南部一带地下水埋深最深值 71.95 m(2014 年 6 月),东北部地下水埋深最浅处值为 1.4 m(2011 年 6 月)。由于人力物力资源限制观测井数据的采样是按月进行,并且抽样时间和抽样时机(抽水灌溉前或抽水灌溉后)均不固定;因为采样时间和时机不固定,可能使得不同年份在相同月份的数值对比时差异性较大;再者测量设备陈旧,导致某些井位数据长期缺失。这些测量数据时出现的问题可能导致后期模拟的地下水等值线图(图 1)与实际情况有出入,只能大概估计出策勒绿洲地下水埋深分布与动态变化。



图 1 策勒绿洲地下水埋深分布

绿洲外围防风沙侵蚀作用的过渡带荒漠草地植被在高、中、低 3 种需水水平下绿洲生态需水量与农业需水量之和分别为 1.395×10^8 , 1.363×10^8 和 $1.332 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。策勒绿洲常年炎热干燥并且极少降雨,水资源补给仅依靠策勒河这条年均径流量为 $1.28 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的内陆河,因此,需要透支抽取的地下水量分别为 1.15×10^7 , 8.30×10^6 和 $5.20 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。根据公式(2)当需要抽取此量的地下水时,策勒绿洲扇形区域潜水层水位平均下降高度分别为 0.60, 0.38 和 0.27 m。策勒绿洲生态需水量会随绿洲自然景观植被长势不同而变化,需水量为 $3.26 \times 10^7 \sim 3.89 \times 10^7 \text{ m}^3$,占到策勒河年均径流量近 3 成。策勒绿洲消耗大量水资源用于维持绿洲生态,但仍然余下近 7 成河流径流量可用于农业生产。只要能够合理开发利用这部分水资源进行农业灌溉,仍然能够实现绿洲的可持续发展。但由于策勒绿洲农业用水灌溉方式与

用水管理策略水平落后,使得绿洲农业用水总需求量达 $1.006 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。绿洲总用水缺口为 $5.20 \times 10^6 \sim 1.15 \times 10^7 \text{ m}^3$,最大用水缺口占到策勒河年均径流量近一成,这部分水量需要从绿洲地下水中抽取。虽然每年透支抽取地下水的数额不多,但是绿洲中储藏有地下水的面积并不大,使得抽取的这部分份额能够影响到绿洲地下水的整体分布。使用 ArcGIS 10.1 中普通克里金差值功能,利用策勒绿洲 25 口地下水长期观测井数据模拟出地下水埋深等值线图(图 1)。由此,可观测到绿洲地下水埋深在空间尺度上变化明显。

根据式(1)的 Thiessen 多边形法计算 2008—2014 年 6 月的地下水平均埋深(表 4)依次为 20.78 m(2008 年 6 月),22.01 m(2009 年 6 月),22.32 m(2010 年 6 月),19.58m(2011 年 6 月)和 20.90m(2014 年 6 月),可以看出绿洲地下水平均埋深有升有降,基本维持在 21 m 上下,整体变化不大。

表 4 2008—2014 年策勒河径流量与策勒绿洲地下水平均埋深

项目	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年
策勒河径流量/ 10^8 m^3	1.067	0.776	2.163	1.659	2.170	1.587	1.175
地下水平均埋深/m	20.78	22.01	22.32	19.58	—	—	20.90

说明策勒绿洲的地下水埋深趋于稳定,并未出现异常波动的情形。究其原因是由于近几年策勒河径流量充足,这加快了对地下水的补给速度,使得绿洲地下水平均埋深没有出现预期中的下降。近几年策勒绿洲地下水埋深在空间结构上变化显著,说明地下水资源的连通性在增加,此时脆弱性也在增加^[37](图 1)。当策勒河来水量减少时,必定会促使绿洲加强对地下水的开采力度,使得地下水埋深变化明显,致使地下水水位难以恢复。尽管近几年策勒河径流量充足,但绿洲每年都需抽取 $6.0 \times 10^7 \sim 1.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ 地下水进行绿洲农业生产。原因在于策勒河属于高山融雪形成的河流,每年 6—8 月是径流高峰期,占河流全年流量 70%,而作为绿洲用水需求最大份额的农业需水期为 4—9 月,并且每个月份需水量相对均衡,

这造成策勒绿洲用水需求与供给时间不相吻合,导致农业用水在河流汛期前后都需抽取地下水进行灌溉。并且绿洲离策勒河较远的区域是直接抽取地下水进行农业灌溉,而径流对地下水的补给速度远不及地下水的抽取速度。正如 2011—2014 年策勒河径流补给量巨大,但地下水的平均水位却没有明显上升;而当 2008—2009 年策勒河径流不足时,地下水水位平均埋深下降明显。因此,影响策勒绿洲地下水埋深空间分布变化的最主要因素有 2 个,首先是策勒绿洲常年抽取地下水灌溉而通过策勒河汛期补给地下水的生产方式,其次为策勒河径流量的不确定性。

4 讨论

农业灌溉作为绿洲水资源消耗的主体,策勒绿洲

每年消耗 $1.006 \times 10^8 \text{ m}^3$ 水资源进行农业生产。本文粗略估计出维持策勒绿洲生态需水与满足农业灌溉用水时绿洲每年用水缺口为 $5.20 \times 10^6 \sim 1.15 \times 10^7 \text{ m}^3$, 虽然绿洲用水缺口占策勒绿洲每年径流补给量的比例很小, 但整个策勒绿洲面积很小抽取等量的地下水补足绿洲用水缺口时, 会使绿洲平均地下水埋深下降 $0.27 \sim 0.60 \text{ m}$ 。策勒河径流量以年尺度下观察波动幅度较大, 使得只依靠径流补给的策勒绿洲地下水, 每年的地下水平均埋深变动幅度较大。因此, 4, 5 a 短期观察不出地下水埋深是否变大, 但若是考虑 $10 \sim 15 \text{ a}$ 中长期对地下水埋深的影响, 这种变化却是非常剧烈。这不仅使得地下水平均埋深下降 $3 \sim 5 \text{ m}$, 由于策勒绿洲地下水资源由南向北汇集的分布特点, 更会使得绿洲南部地下水埋深下降地更加明显, 甚至这部分地区地下水资源会出现枯竭的严重后果。再者, 近年来策勒县总人口从 2008 年的 14.75 万增加到 2015 年的 16.67 万, 策勒绿洲这样以农业驱动经济的发展模式, 人口数量的增长导致人均耕地面积减少, 不仅对区域经济发展产生巨大压力, 同时对粮食的基本需求也在增加。因此, 促进绿洲发展的首选必然是扩张人工绿洲, 人工绿洲的扩张将导致灌区耕地面积的扩大, 这将加大对地下水资源的开发强度, 使得地下水埋深下降速度进一步加快。绿洲地下水埋深的下降和人工绿洲的扩张过程导致流域内过渡带植被和天然绿洲的退化和面积萎缩, 这会导致维护绿洲安全的生态屏障功能下降, 进而威胁到绿洲社会经济的可持续发展。

策勒绿洲人口的增长和人工绿洲的扩张加剧了绿洲地下水的开采强度, 这种趋势未来几年不会衰减。因此, 策勒绿洲在未来几年水资源会更加紧缺, 为了减轻绿洲水资源紧缺对绿洲的影响, 当地政府应加强对农业用水的管理, 并投入资金建设节水设施, 提高对水资源的利用效率。策勒绿洲农业节水设施建设发展现处于起步阶段, 扇形绿洲区农业灌溉方式几乎全为引水漫灌, 节水设施建设潜力巨大。绿洲节水设施的建设目前只停留在工程节水上, 即修建更新引水渠, 降低引水时水渗透造成的浪费。虽然当地在农业发展中投入资金很多, 但基本投入到传统粮食作物转型经济林作物和农业补贴上, 而作物转型现已接近尾声, 在今后几年会有大量资金投入农业节水设施的建设上。策勒绿洲农民文化水平普遍偏低, 不了解农业节水对地区发展的深远作用, 因此, 需要加强对农民节水意识的宣传。当策勒河径流量不足需要对农业用水进行限额灌溉和重新分配时, 可以投入资金利用经济补偿的手段, 有效调节农业灌溉与维持绿洲地下水资源稳定和健康的用水冲突。政府也应为

不同作物灌溉者提供额外经济补贴, 刺激和鼓励灌溉者更换先进的节水设备和采用先进的灌溉技术。

绿洲种植结构的改变, 需要精确度量经济林种需水规律, 但目前相关研究还比较滞后, 此外为了简化估计绿洲农业用水需求, 研究中只考虑占绿洲多数的经济林作物, 把其他作物按经济林作物比例转化为经济林作物对待, 这都导致农业用水量势必包含较大误差; 而绿洲农业漫灌用水方式也使得策勒站估计的不同作物年灌水量与实际用水需求产生较大差异。Xue^[31]等估计生态环境需水量方法的科学性 with 准确性需要进一步的改进与研究, 因此, 在今后的研究中需要投入更多的精力到数据的收集整理与寻找更精确的研究方法。

5 结论

(1) 策勒绿洲生态和农业需水总量为 $1.332 \times 10^8 \sim 1.395 \times 10^8 \text{ m}^3$, 每年需要透支 $5.20 \times 10^6 \sim 1.15 \times 10^7 \text{ m}^3$ 地下水资源维持绿洲发展。由于策勒绿洲透支使用地下水资源, 会使绿洲每年平均地下水埋深下降 $0.27 \sim 0.6 \text{ m}$ 。

(2) 通过使用 Thiessen 多边形法计算 2008—2014 年 6 月地下水平均埋深, 发现绿洲地下水平均埋深有升有降, 基本维持在 21 m 上下, 整体变化不大。原因是近几年策勒径流量充足, 这加快了地下水的补给速度, 使得绿洲地下水平均埋深没有出现预期中的下降。

(3) 使用 ArcGIS 10.1 中普通克里金差值方法模拟出 2008 年 6 月、2011 年 6 月和 2014 年 6 月地下水埋深等水位线图, 可以看出近几年策勒绿洲地下水埋深在空间结构上变化明显, 说明地下水资源的连通性在增加, 同时脆弱性也在增加。

(4) 策勒绿洲地区持续的人口增长, 导致人均耕地面积不断减少。促进绿洲发展的首选是扩张人工绿洲, 人工绿洲的扩张导致灌区耕地面积的扩大, 这将加大对地下水资源的开发强度。因此, 绿洲在今后几年的水资源供需矛盾会更加紧张, 这会进一步刺激地下水埋深的下降速度。

(5) 策勒绿洲这样水资源供给单一且水资源需求持续增长的地区, 通过不断开采地下水维持绿洲发展的策略是不能长久的。解决绿洲水资源短缺的根本途径是控制人工绿洲的扩张, 限制水资源需求的进一步增长; 并通过政策刺激和鼓励灌溉者更换先进的节水设备和采用先进的灌溉技术, 提高水资源的利用效率。

[参 考 文 献]

- [1] 张勃, 李吉均. 河西地区黑河流域土地资源优化配置研究[J]. 中国沙漠, 2000, 20(4): 383-388.

- [2] 高前兆,李福兴.黑河流域水资源合理开发利用[M].甘肃省兰州市:甘肃科学技术出版社,1991.
- [3] 王根绪,程国栋.干旱内陆流域生态需水量及其估算:以黑河流域为例[J].中国沙漠,2002,22(2):129-134.
- [4] 李述刚,程心俊,王周琼.荒漠绿洲农业生态系统[M].北京:气象出版社,1998.
- [5] 陈兴鹏,康尔泗.河西走廊绿洲生态经济系统良性循环的水资源问题[J].中国沙漠,2000,20(1):90-94.
- [6] 樊自立,马英杰,王让会,等.干旱区内陆河流域生态系统类型及其整治途径:以新疆为例[J].中国沙漠,2000,20(4):393-396.
- [7] 董雯,杨宇,张豫芳.绿洲城镇发展与水土资源开发的耦合效应及其时空分异[J].资源科学,2013,35(7):1355-1362.
- [8] 徐建华,罗格平,牛达奎.绿洲型城市生态经济系统持续发展仿真研究[J].中国沙漠,1996,16(3):234-240.
- [9] 陈丽娟,冯起,王昱,等.民勤绿洲地下水环境动态研究[J].干旱区资源与环境,2012,26(7):8-13.
- [10] 桂东伟,雷加强,曾凡江,等.绿洲农田土壤粒径分布特征及其影响因素分析:以策勒绿洲为例[J].土壤,2011,43(3):411-417.
- [11] 王海锋,王忠静,雷志栋,等.干旱内陆河区绿洲演化警戒线及其应用研究[J].水力发电学报,2006,25(4):34-39.
- [12] 冯绍元,霍再林,康绍忠,等.干旱内陆区自然—人工条件下地下水位动态的 ANN 模型[J].水利学报,2007,38(7):873-878.
- [13] 赵静,蔡明科,魏晓妹,等.宝鸡峡灌区地下水动态规律分析及预测[J].地下水,2009,31(6):5-7.
- [14] Dong Zhibao, Man Duoqing, Luo Wangyin, et al. Horizontal aeolian sediment flux in the Minqin area, a major source of Chinese dust storms. [J]. Geomorphology, 2010,116(1/2):58-66.
- [15] Grogan D S, Zhang Fan, Prusevich A, et al. Quantifying the link between crop production and mined groundwater irrigation in China[J]. Science of the Total Environment, 2015,511:161-175.
- [16] 赵翠莲,杨自辉,刘虎俊,等.民勤绿洲水资源利用与生态系统退化分析[J].中国沙漠,2006,26(1):90-95.
- [17] 黄珊,周立华,陈勇,等.近 60 年来政策因素对民勤生态环境变化的影响[J].干旱区资源与环境,2014,28(7):73-78.
- [18] 柴成武,徐先英,王方琳.石羊河下游民勤绿洲荒漠化影响因素趋势预测[J].中国水土保持科学,2007,5(4):34-38.
- [19] 肖笃宁,李小明,宋冬梅.石羊河尾间绿洲的景观变化与生态恢复对策[J].生态学报,2005,25(10):2477-2483.
- [20] 王芳.主成分分析与因子分析的异同比较及应用[J].统计教育,2003(5):14-17.
- [21] 杨怀德,冯起,郭小燕,等.1991—2013 年民勤绿洲地下水埋深年际变化动态及影响因素[J].中国沙漠,2017,37(3):362-370.
- [22] 袁健,马小雷,金鹏飞,等.基于泰森多边形法的地下水平均水位计算[J].地下水,2016(3):29-30.
- [23] 李飞,田万顺.流域面雨量的计算方法[J].气象与环境科学,2003(3):20-21.
- [24] 方慈安,潘志祥,叶成志,等.几种流域面雨量计算方法的比较[J].气象,2003,29(7):23-26.
- [25] 毕宝贵,徐晶,林建.面雨量计算方法及其在海河流域的应用[J].气象,2003,29(8):39-42.
- [26] 田二柱.昆仑山北麓地下水资源分布特征及综合利用[J].水文地质工程地质,1986(1):53-55.
- [27] Xue Jie, Gui Dongwei, Lei Jiaqiang, et al. A decision-making framework to model environmental flow requirements in oasis areas using Bayesian networks[J]. Journal of Hydrology, 2016,540:1209-1222.
- [28] Rumbaer C, Thevs N, Disse M, et al. Sustainable management of river oases along the Tarim River in North-Western China under conditions of climate change[J]. Earth System Dynamics Discussions, 2014, 5(2):1221-1273.
- [29] Sun Tao, Yang Zhifeng, Shen Zhenyao, et al. Ecological water requirements for the source region of China's Yangtze River under a range of ecological management objectives [J]. Water International, 2012,37(3):236-252.
- [30] Congalton R G. A review of assessing the accuracy of classification of remotely sensed data[J]. Remote Sensing of Environment, 1991,37(1):35-46.
- [31] Xue Jie. Quantification of environmental flow requirements to support ecosystem services of Oasis areas: A case study in Tarim Basin, Northwest China [J]. Water, 2015,7(10):5657-5675.
- [32] 王让会,卢新民,宋郁东,等.西部干旱区生态需水的规律及特点:以塔里木河下游绿色走廊为例[J].应用生态学报,2003,14(4):520-524.
- [33] 瓦哈甫·哈力克,塔西甫拉提·特依拜,海米提·依米提.干旱区绿洲农业结构与水资源合理利用研究:以新疆策勒绿洲为例[J].云南农业大学学报,2004,19(6):737-742.
- [34] 毛东雷,雷加强,李生宇,等.新疆策勒绿洲—沙漠过渡带地表沙物质理化性质空间差异[J].中国沙漠,2015,35(1):136-144.
- [35] 石朋,芮孝芳.降雨空间插值方法的比较与改进[J].河海大学学报:自然科学版,2005,33(4):361-365.
- [36] 赵全升,胡舒娅,冯娟,等.柴达木盆地盐湖卤水层给水度分布变化特征[J].地理科学,2017,37(1):148-153.
- [37] 蒙波,桂东伟,曾凡江,等.塔里木盆地南缘绿洲地下水时空变异与监测点位优化:以策勒绿洲为例[J].水土保持通报,2016,36(2):209-215.