

引用格式:孙思奥,任宇飞,张蔷.多尺度视角下的青藏高原水资源短缺估算及空间格局[J].地球信息科学学报,2019,21(9):1308-1317. [Sun S O, Ren Y F, Zhang Q. A multi-scale perspective on water scarcity assessment in Tibetan Plateau[J]. Journal of Geo-information Science, 2019,21(9):1308-1317.] DOI:10.12082/dqxxkx.2019.180510

多尺度视角下的青藏高原水资源短缺估算及空间格局

孙思奥¹,任宇飞^{1,2},张 蔷¹

1. 中国科学院地理科学与资源研究所区域可持续发展与模拟重点实验室,北京 100101;
2. 中国科学院大学资源与环境学院,北京 100049

A Multi-scale Perspective on Water Scarcity Assessment in the Tibetan Plateau

SUN Si'ao^{1*}, REN Yufei^{1,2}, ZHANG Qiang¹

1. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The total water resource in the Tibetan plateau is abundant. However, some areas within the plateau are faced with severe water scarcity due to the spatial mismatch between available water resources and demands of population and industries. In this study, multiple sources of data were used to evaluate water supply and demand relationships in Qinghai and Tibet. Water scarcity degrees were assessed at the county, prefecture, and province levels in the Tibetan Plateau for 5 year, 10 year, 20 year and 30 year return periods. The effect of spatial scales on water scarcity assessment was analyzed by comparing water scarcity levels based on analyses on different spatial scales. The spatial pattern of water scarcity in the Tibetan Plateau was characterized, and the population and areas that suffered from water scarcity were identified. At the provincial level, no water scarcity occurred in the Tibetan plateau. Three out of 15 prefectures in the Tibetan Plateau were faced with water scarcity. Twenty nine out of 115 counties had water scarcity problems. Water scarce counties were mostly located in relatively highly populated and urbanized areas including River Huang Valley, Qaidam Basin and the basins of Yarlung Zangbo River, Lhasa River and Nianchu River. Overall, the population and areas faced with water scarcity at the county level were larger than at the prefecture and provincial levels. This can be explained by the spatial difference of water uses between counties. At the county level, 56.4% population and 10.4% areas were faced with water scarcity based on 30 years return period. The rank correlation coefficients of water scarcity degrees in different years in water-scarce counties indicate that counties in the same province are likely to experience water scarcity in same periods, while the chance of counties in different provinces experiencing water scarcity in the same year is rather random. Our findings provide useful information for sustainable water resource exploitation toward coordinated urbanization and resources and environmental management in the Tibet Plateau.

Key words: water scarcity; spatial scale effect; Tibetan Plateau; water use; return period

***Corresponding author:** SUN Si'ao, E-mail: suns@igsrr.ac.cn

收稿日期:2018-10-09;修回日期:2019-02-26.

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项课题(XDA20040401);国家自然科学基金项目(41730645)。[**Foundation items:** Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA20040401; National Natural Science Foundation of China, No.41730645.]

作者简介:孙思奥(1983-),女,湖南津市人,博士,助理研究员,主要从事城市水文与水资源管理研究。E-mail: suns@igsrr.ac.cn

摘要: 青藏高原水资源总量丰富,但由于水资源量与用水量在空间上分布不均衡,部分人口、城镇密集地区水资源短缺严重。本研究在多源数据的基础上,通过空间分析、降尺度处理等,建立了青藏高原省区、市域、县域空间尺度的水资源与用水量数据集。通过比较5、10、20、30年重现期多空间尺度的水资源短缺程度,分析水资源短缺在青藏高原的尺度效应,揭示青藏高原水资源短缺格局与特征,识别面临水资源短缺的人口与面积。结果表明,青藏高原在省区尺度无水资源短缺;在15个市域单元中,有3个市域出现水资源短缺;在115个县域单元中,有29个县域呈现出不同程度的水资源短缺,水资源短缺县域主要集中在青海省的河湟谷地、柴达木盆地与西藏自治区的一江两河流域等人口、城镇密集区域。总体而言,由于较大空间尺度地理单元内部各县域用水强度差异,在县域尺度面临水资源短缺的人口与面积大于市域与省区尺度面临水资源短缺的人口与面积。以县域为基本单元,发现青海省与西藏自治区30年重现期面临水资源短缺的人口占总人口的56.4%,出现水资源短缺的面积占总面积的10.4%。县域之间水资源短缺指数秩相关系数计算结果显示,省区内部各县域同时出现水资源短缺的可能性较大,而省区之间各县域同时出现水资源短缺的可能性相对随机。研究结果为制定青藏高原水资源短缺管理对策、促进区域城镇化与资源环境协调发展提供科学依据。

关键词: 水资源短缺;空间尺度效应;青藏高原;用水量;重现期

1 引言

青藏高原是众多大江大河的发源地^[1-2],水资源总量极其丰富,是维持中国乃至亚洲地区生态系统的重要水塔^[3]。青海、西藏多年平均水资源总量分别为607.3亿 m^3 、4395.9亿 m^3 ^[4-5],约占全国水资源总量的18%;人均水资源占有量为54 860 m^3 (按照2015年人口计算),约为全国人均占有量的27倍。水资源利用率极低,1997–2016年青海省与西藏自治区的水资源年平均开采量为58.3亿 m^3 ^[6],仅占水资源总量的1.2%。然而,青藏高原水资源在时空分布上表现出显著的差异性,降水量由东南向西北、由南向北递减,受气流与地形的影响,年降水量分布在数十毫米到5000毫米不等^[7]。在自然条件约束下,青藏高原人口、城镇则多布局在海拔较低、适宜人类居住的谷地、盆地与丘陵地区,如青海省人口主要居住在河湟谷地、柴达木盆地^[8-9],西藏自治区人口主要集中在一江两河流域^[10],这些区域用水需求巨大。尽管青藏高原大部分地区水资源开发程度极低,然而由于水资源与用水需求在空间分布上存在严重的错配关系,部分地区水资源供需矛盾极度突出。

目前,水资源短缺已经成为限制许多国家及地区社会经济发展的主要瓶颈,是人类社会可持续发展面临的主要挑战之一^[11]。科学的水资源短缺评价是理解水资源开发利用现状、制定相应水资源管理政策、应对和解决水资源短缺的基础,因而,水资源短缺评价研究成为近年来可持续发展、水资源管理研究领域的热点之一^[12-14]。最常用的度量水资源短缺的指标为:水资源拥挤度指数(Water Crowding Index,即用人均水资源量表征)^[15];Falkenmark

指数,即用水量与可利用水资源量比值^[16]。水资源拥挤度指数仅考虑了水资源供应侧原因造成的水资源短缺^[17]。Falkenmark指数同时考虑了水资源供应侧与需求侧对水资源短缺的作用^[18],能够反映水资源需求管理对水资源短缺的影响,其数值一般在0~1之间。当Falkenmark指数大于1时,用水量大于可利用水资源量,用水可能依靠地下水超采与外地调水保障。其他水资源短缺指数包括:水贫乏指标(Water Poverty Index),定义为由水资源量、利用率、用水和水环境等多指标构成的指标体系的权重和^[19];基于水足迹的水资源短缺指数^[20];考虑水质的水资源短缺指数^[21-22]等。相较于水资源拥挤度指数与Falkenmark指数,这些指标考虑了更多影响水资源短缺的因素,但由于其复杂性与数据的可获得性,应用相对有限。

随着全球水文模型的完善和空间分析工具的发展,近年来的全球水资源短缺研究取得了较大进展,结果显示大流域尺度的水资源短缺测算无法揭示流域内部水资源短缺程度的不均衡性^[23]。在中国范围内,水资源短缺研究常侧重于对单个地区(省、市等地理单元)评价^[24-25],针对水资源短缺评价空间尺度效应的研究仍显不足。

本研究选择水资源总量相对丰富的青藏高原为研究区域,以青海省与西藏自治区行政边界划定的区域为研究范围,在两省区水资源量与用水量统计数据的基础上,应用空间分析方法,根据高空间分辨率人口、土地利用、水文模拟等信息,将统计数据降尺度处理,得到县域和市域的相应数据集,用于测算青藏高原不同重现期水平县域、市域及省区尺度的Falkenmark水资源短缺指数。通过比较不同空间尺度的水资源短缺程度,分析其空间尺度效

应。本研究旨在揭示青藏高原水资源短缺现状格局与特征,识别水资源短缺的人口与面积,为青藏高原水资源短缺管理、区域尺度上的水资源优化配置提供依据,为制定水资源保护管理对策、促进青藏高原经济社会可持续发展具有现实意义。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本文分析比较青藏高原省区、市域、县域尺度的水资源短缺状况。其中,省区尺度包括青海省与西藏自治区2个省区,市域尺度包括西宁市、拉萨市等15个市域单元,县域尺度包括115个县域单元。受雨水等气候因素随机性的影响,水资源量呈现出年际波动性。青海省与西藏自治区1997–2012年的水资源量来源于中国水资源年报^[6]。Zhang等^[26]提供可供公开下载的全国1952–2012年 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的VIC水文模拟结果。模拟水资源量由VIC水文模拟输出结果中的网格地表径流量与地下径流量求和得到。根据省区尺度1997–2012年的统计水资源量,将VIC水文模型的模拟结果进行校核,即在青海省与西藏自治区分别引入校正系数 α ,令VIC水文模型模拟的省区水资源量与 α 的乘积等于统计水资源量。通过将青海省与西藏自治区1997–2012年水资源量校正系数 α 的平均值应用于1952–1996年VIC水文模型输出系列,对1952–1996年两省区的VIC水文模型输出水资源量进行修正,最终得到校核后 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 青藏高原各县域水资源量时间序列数据。

青海省与西藏自治区的用水量根据2015年用水水平得到。青海省与西藏自治区地级市域尺度的农业、工业、生活以及生态用水量来源于2015年青海省与西藏自治区的水资源公报^[4–5]。地级市域各类用水数据根据县域农业面积、工业GDP增加量、人口降尺度至县域尺度。青藏高原各县域农业用地面积来源于2015年土地利用数据^[27],各县域2015年工业GDP增加量来源于县市社会经济统计年鉴–2015年^[28],各县域2015年人口数量由2015年1%人口抽样调查数据得到。

2.2 研究方法

青藏高原县域各类用水量在地级市域尺度统计数据的基础上降尺度得到。假设同一地级市范

围内单位农业用地用水量相同,地级市农业用水量根据各县域的农业用地面积降至县域尺度,即,同一地级市范围内的各县域农业用水量与农业用地面积成正比,同时满足各县域农业用水量总和等于市域农业用水量;假设同一地级市范围内生产单位工业GDP的用水量相同,地级市工业用水量根据各县域的工业GDP降至县域尺度;假设同一地级市范围内人均生活用水量相同,地级市生活用水量根据各县域的人口数量降至县域尺度;生态用水通常用于城市绿地灌溉和河湖补水,青海省与西藏自治区生态用水量仅为总用水量的1.0%,假设生态用水量与其他3种用水量总和成正比,在同一地级市范围内根据各县域其他3种用水量的总和降至县域尺度。

各地理单元(省区、市域或县域)的水资源短缺程度由水资源短缺Falkenmark指数WSI度量。

$$WSI = \frac{WU}{WR} \quad (1)$$

式中: WU 和 WR 分别为某个地理单元境内的用水量与水资源量。水资源短缺程度常根据 WSI 的数值划分为不同等级^[16]:当 $WSI \leq 20\%$ 时,无水资源短缺;当 $20\% < WSI \leq 40\%$ 时,水资源轻度短缺;当 $40\% < WSI \leq 70\%$ 时,水资源中度短缺;当 $WSI > 70\%$ 时,水资源极度短缺。

不同重现期的水资源短缺程度根据不同重现期的水资源量计算,用水量按照2015年用水水平考虑。各地理单元1952–2012年水资源量数据系列的经验分布函数为:

$$cdf(x) = \frac{i}{n+1} \quad (2)$$

式中: $cdf(x)$ 代表水资源量 x 的经验累计分布函数; n 为数据序列长度($n=61$),将全部数据系列按照从小到大排序; i 为水资源量 x 在整个数据系列中的排序。重现期 $RP(x)$ 与经验分布函数的关系为:

$$RP(x) = \frac{1}{1 - cdf(x)} \quad (3)$$

本研究测算青藏高原各地理单元不同重现期水平($RP=5、10、20、30$ 年)水资源短缺情况。通过比较省区、市域、县域不同重现期的水资源短缺指数,讨论水资源短缺测算结果对于空间尺度的敏感性;通过统计不同重现期各地理单元水资源短缺指数的特征统计值,分析青藏高原县域尺度的水资源短缺情况;通过在地理空间上展示青藏高原各县域单元的水资源短缺指数,研究水资源短

缺格局,识别青藏高原缺水区域。由于水资源量在空间及时间分布的随机性,不同地理单元出现水资源短缺的年份可能不一致,本文在提取青藏高原水资源短缺县域基础上,通过计算县域之间水资源短缺指数的 Spearman 秩相关关系,分析不同县域出现水资源短缺的年际差异性。不同空间尺度各重现期面临水资源短缺的人口与面积比例累计曲线公式如下:

$$cdf_{pop}(y) = \frac{\sum_{WSI_i < y} pop_i}{\sum_i pop_i} \quad (4)$$

$$cdf_{area}(y) = \frac{\sum_{WSI_i < y} area_i}{\sum_i area_i} \quad (5)$$

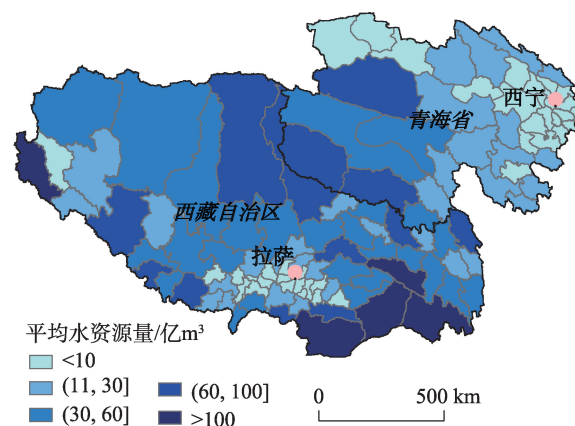
式中: cdf_{pop} 与 cdf_{area} 分别为面临水资源短缺人口与面积比例累计曲线; y 指示水资源短缺程度; WSI_i 为第 i 个地理单元的水资源短缺指数; pop_i 与 $area_i$ 分别为第 i 个地理单元的人口数量与面积。通过比较不同空间尺度各重现期面临水资源短缺人口与面积比例的累计曲线,揭示面临水资源短缺人口与面积的尺度特征及相关关系。

3 结果及分析

3.1 可利用水资源量及县域空间差异

青海省与西藏自治区各县域单元的多年平均可利用水资源量(1952–2012年)如图1所示。受气候、面积、下垫面的影响,各县域的水资源量呈现出极大的差异性。西宁、拉萨周边的县域单元由于面

积较小,水资源量偏小,青藏高原东南边由于降雨充沛,水资源量偏高。在115个县域单元中,西宁市的年平均水资源量最小,仅为0.5亿 m^3 ;墨脱县的年平均水资源量最大,高达1082.0亿 m^3 。青海省与西藏自治区的多年平均水资源量分别为643.4亿 m^3 和4896.8亿 m^3 ,人均水资源量分别为10 932 m^3 和151 145 m^3 。由于较低的人口密度,青海省与西藏自治区的人均水资源量远高于全国平均水平。图2给出了青藏高原部分县域不同重现期的水资源量。水资源量随着重现期的增长而增长,不同县域水资源量的经验分布函数差异较大,重现期30年的水资源量是重现期2年的水资源量的1.5~4倍。



注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)2893的标准地图制作,底图无修改。

图1 1952–2012年青海省与西藏自治区各县域单元多年平均可利用水资源量

Fig. 1 Multi-year average available water resource for each county of Qianghai and Tibet from 1952 to 2012

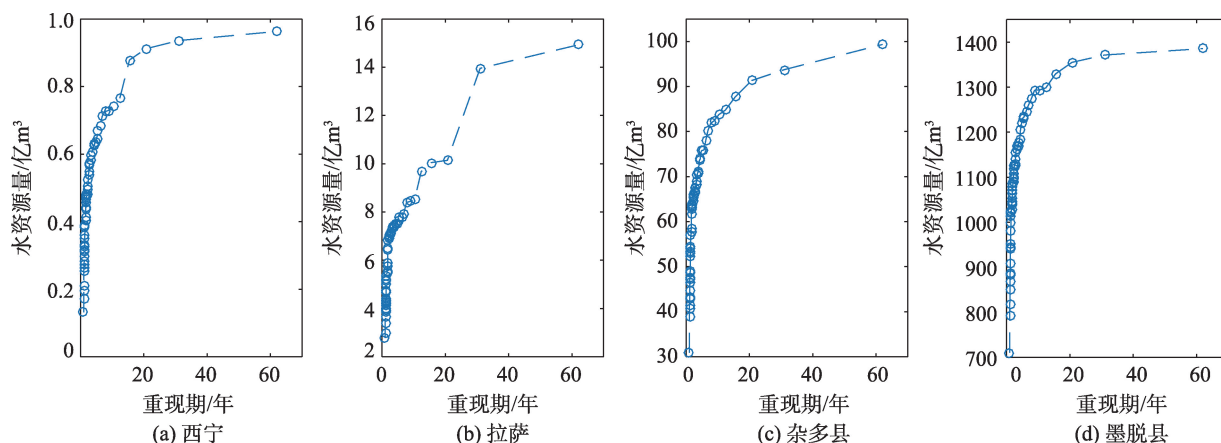


图2 青藏高原典型县域基于经验分布函数不同重现期的水资源量

Fig. 2 Available water resources of different return periods based on empirical distribution functions for typical counties in Tibetan Plateau

3.2 用水量及县域空间差异

2015年青海省和西藏自治区的用水量分别为26.8亿 m^3 和30.8亿 m^3 。两省区的用水结构如图3所示。农业用水占比75%以上,远超其它部门用水,其中西藏自治区的农业用水占比更是高达88.8%。青海省工业与生活用水分别占比10%左右,西藏自治区生活与工业用水分别占比5%左右。青海省与西藏自治区生态用水分别仅占省区总用水量的2.0、0.2%。2015年青海省与西藏自治区人均用水量分别为455 m^3 与951 m^3 ,青海省人均用水量水平与全国平均水平相当,西藏自治区人均用水量远超全国平均水平。

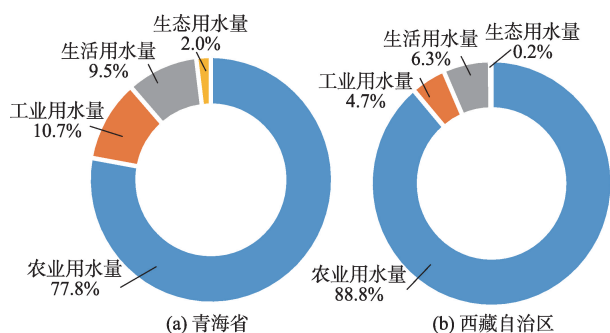
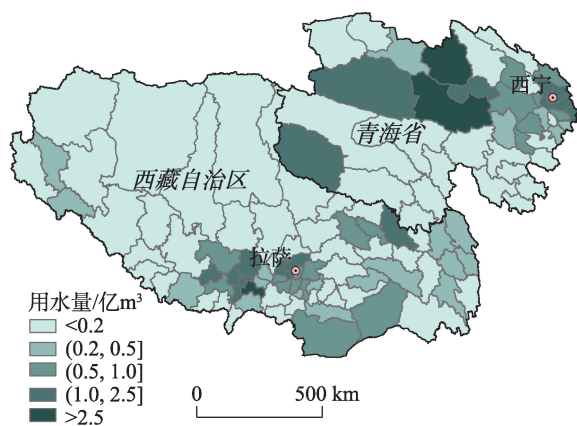


图3 2015年青海省与西藏自治区用水结构

Fig. 3 Water use structures of Qinghai and Tibet in 2015

青藏高原各县域单元的用水量见图4,各县域的用水量呈现出较大的空间差异性,在0.003亿~4.000亿 m^3 之间。西宁市、环青海湖各市、拉萨市及周边的县域用水量相对较高,青海省南部和西藏自治区北部等高海拔地区因人烟稀少,用水量很小。



注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)2893的标准地图制作,底图无修改。

图4 2015年青海省与西藏自治区各县域用水总量

Fig. 4 Total water use by each county of Qinghai and Tibet in 2015

各县域单元中,江孜县、都兰县、德令哈市、日喀则市、格尔木市、拉萨市用水量较大,超过2.0亿 m^3 。总用水量低于0.2亿 m^3 的县域单元有57个。

3.3 不同重现期水资源短缺估算结果

青藏高原在省区、市域与县域单元不同重现期的水资源短缺指数曲线分别见图5(a)、(b)、(c),其中市域与县域尺度仅给出部分水资源短缺较严重的空间单元的水资源短缺指数曲线。青藏高原幅员辽阔,水资源丰富,在省区尺度层面,青海省与西藏自治区(图5(a))30年重现期的水资源短缺指数分别为0.06和0.01,远低于水资源短缺临界值0.2,不存在水资源短缺问题。

在市域尺度层面,青藏高原的15个市域单元中,青海省有3个市域,即西宁市、海东市、海南藏族自治州,30年重现期水资源短缺指数高于水资源短缺临界值0.2,其指数为1.62、0.57和0.20,分别处于水资源极度短缺、中度短缺和轻度短缺状态(图5(b))。在30年重现期水平下,青海省其他5个市域水资源短缺指数在0.002与0.10区间,无水资源短缺;西藏自治区7个市域的水资源短缺指数在0.001~0.150之间,无水资源短缺,其中拉萨市水资源短缺指数最高。西宁市、海东市和海南藏族自治州20年重现期水资源短缺指数分别为1.51、0.49、0.17;10年重现期水资源短缺指数分别为1.24、0.43、0.16;5年重现期水资源短缺指数分别为1.01、0.40、0.13。可见,西宁市长期处于水资源极度短缺状态,而海东市在5~20年重现期水平处于中度水资源短缺状态,海南藏族自治州在20年重现期水平无水资源短缺。

在县域尺度层面,青藏高原的115个县域单元中,青海省的16个县域与西藏自治区的13个县域30年重现期水资源短缺指数均高于水资源短缺指标临界值0.2,即,约有25%的县域单元出现轻度、中度或极度水资源短缺。水资源短缺最严重的县域为青海省西宁市区(图5(c)),其30年重现期水资源短缺指数高达10.65,其次为青海省湟中县与江孜县,其30年重现期水资源短缺指数分别为1.81与1.33,其他在30年重现期水平水资源处于极度短缺状态的县域单元还包括青海省湟源县、民和回族土族自治县、海东市区、乌兰县、大通回族土族自治县、互助土族自治县、德令哈市区7个县域。西藏自治区拉萨市区30年重现期的水资源短缺指数为0.67,其水资源短缺程度接近于极度短缺。青海省

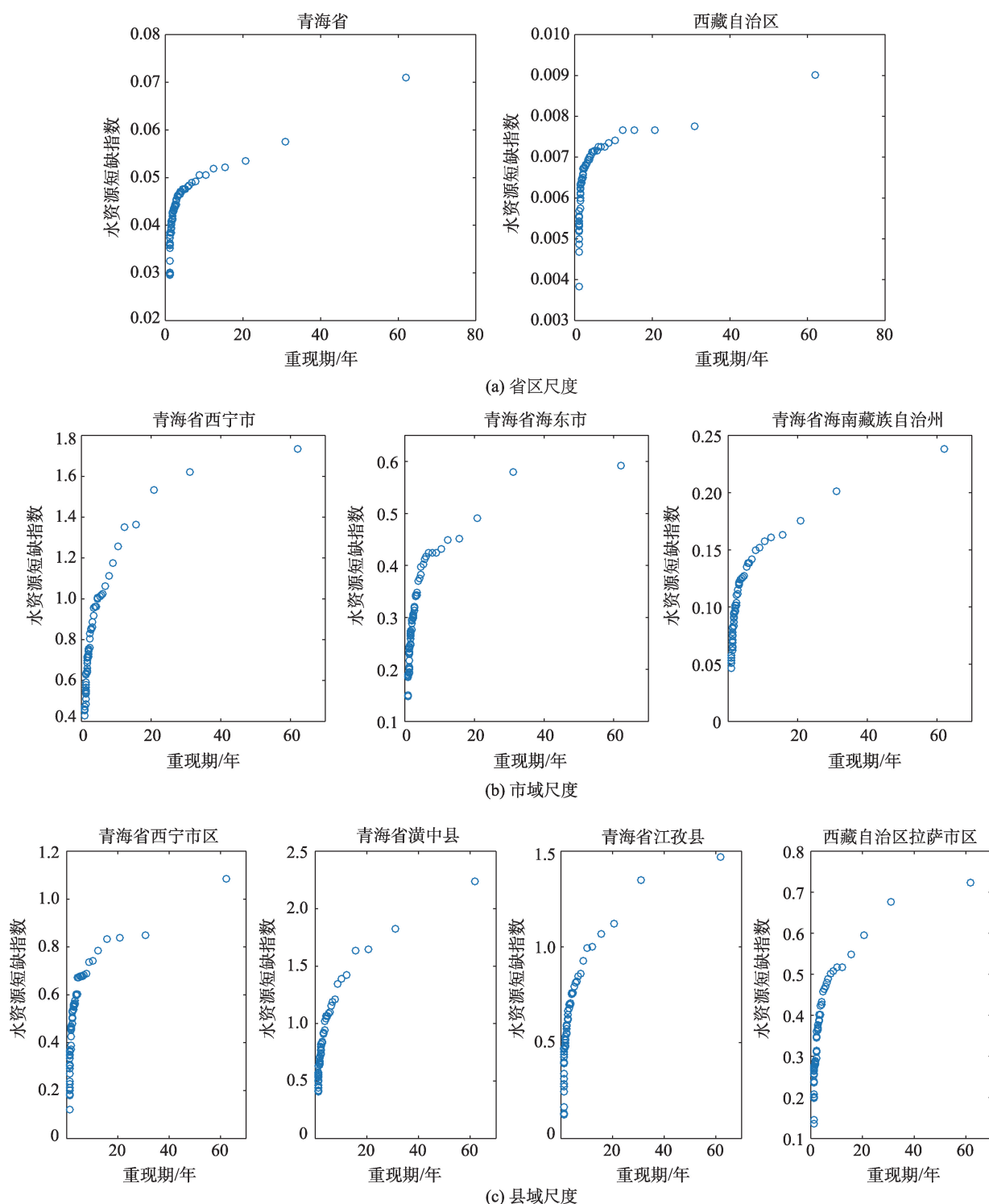


图5 青海省与西藏自治区不同空间尺度部分空间单元不同重现期水资源短缺指数

Fig. 5 Water Scarcity Index values of different return periods in Qinghai and Tibet on different spatial scales

西宁市区5、10、20年重现期的水资源短缺指数分别为6.11、7.20、9.46,湟中县5年、10年、20年重现期的水资源短缺指数分别为1.08、1.38、1.64,江孜县5年、10年、20年重现期的水资源短缺指数分别为0.78、0.98、1.12,长期处于水资源极度短缺状态。

比较青藏高原地区不同空间尺度水资源短缺程度可知,水资源短缺程度的测算结果对于选取的空间尺度非常敏感。从省区尺度来看,青藏高原整体上并不缺水。然而,由于人口、产业分布的空间差异性,局部地区需水强度大,当地水资源无法满

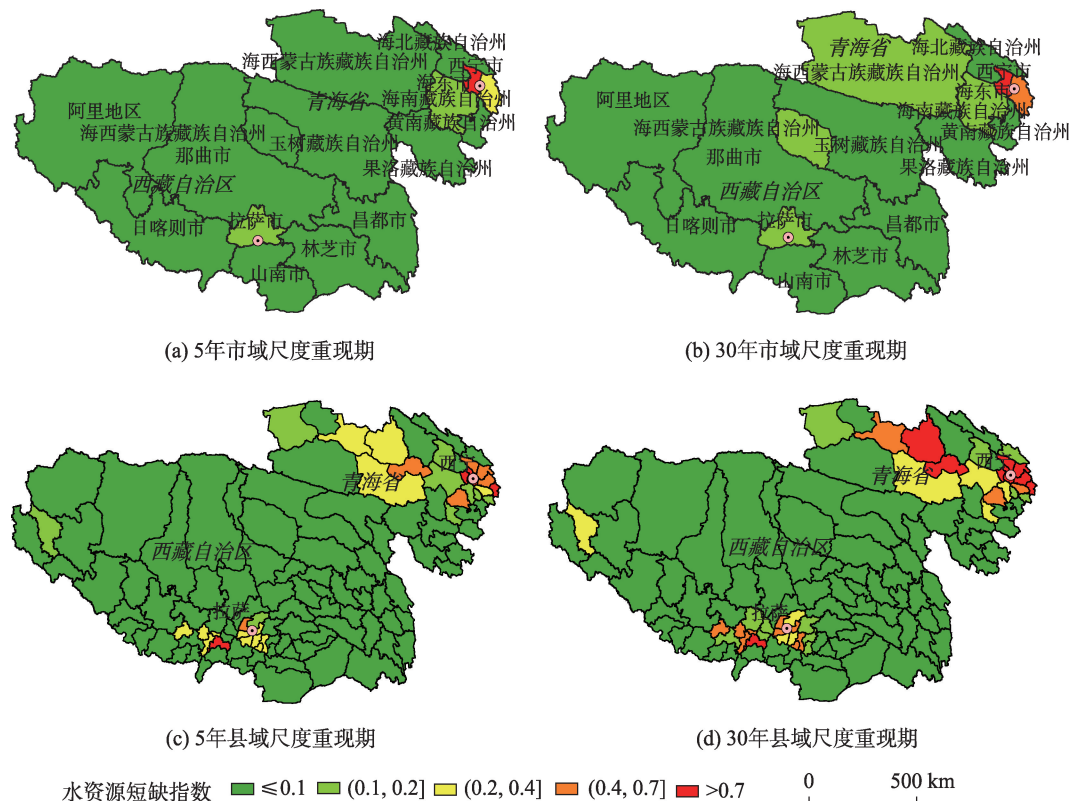
足生活、生产与生态需水要求,水资源压力大,因而在县域尺度,人口相对较多、农业工业产业相对发达的县域水资源短缺指数高,面临着严重的水资源短缺。市域尺度水资源短缺指数测算结果介于省区与县域结果之间。空间尺度太大,无法考虑地理单元内部水资源量与用水的空间差异性。县域尺度的水资源短缺程度测算未考虑不同县域单元之间水资源的流动配置,测算结果反映的是基于自产水资源的水资源短缺程度,因而可能高估或低估部分地理单元实际水资源短缺程度。省区空间尺度的水资源短缺总体情况优于市域和县域空间尺度的水资源短缺情况,也说明了在县域、市域之间进行水资源优化调配以降低部分地理单元水资源短缺的重要性。

3.4 水资源短缺空间格局

图6给出了青藏高原各市域与县域在5年和30年重现期的水资源短缺指数(10年与20年重现期水资源短缺指数的空间格局介于5年与30年重现期的空间格局之间,在此不展示)。县域尺度层面

的水资源短缺区域面积大于市域尺度层面的水资源短缺区域面积,这主要由市域内部各县域用水强度差异造成的。例如,在30年重现期水平,海西蒙古族藏族自治州的水资源短缺指数小于0.2,并无水资源短缺压力,但在县域尺度,其境内的乌兰县、德令哈市面临极度水资源短缺,大柴旦行政委员会面临中度水资源短缺,都兰县有轻度水资源短缺。在市域尺度,水资源短缺程度最高的地理单元为西宁市,30年重现期水资源短缺指数为1.62;而在县域尺度,水资源短缺程度最高的地理单元为西宁市区,30年重现期水资源短缺指数为10.65。

整体而言,即便以县域尺度为基本单元,青藏高原大部分地区水资源短缺指数小于0.2,没有水资源短缺压力。水资源短缺县域主要集中在青海省与西藏自治区首府及其周边,主要为青海省河湟谷地、柴达木盆地、西藏自治区一江两河流域等适宜人类生活生产的区域,与用水集中区域基本一致。青藏高原地区总共有29个县域(包括青海省西宁市区等15个县域和西藏自治区拉萨市区等14个



注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)2893的标准地图制作,底图无修改。

图6 青藏高原115个县域不同重现期的水资源短缺指数

Fig. 6 Water Scarcity Index values of different return periods in the 115 counties of Tibetan Plateau

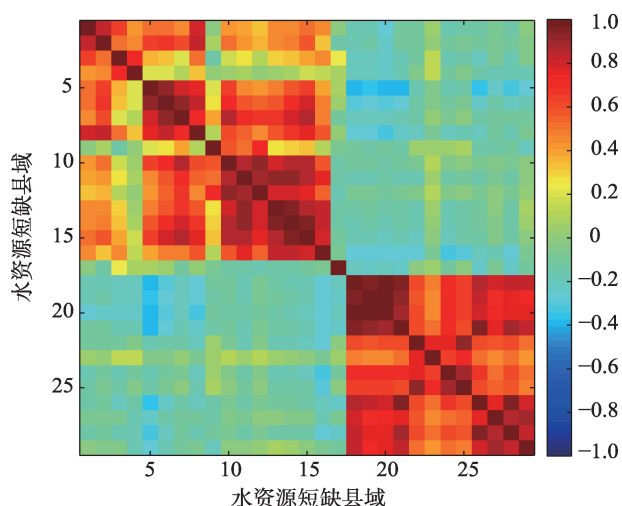


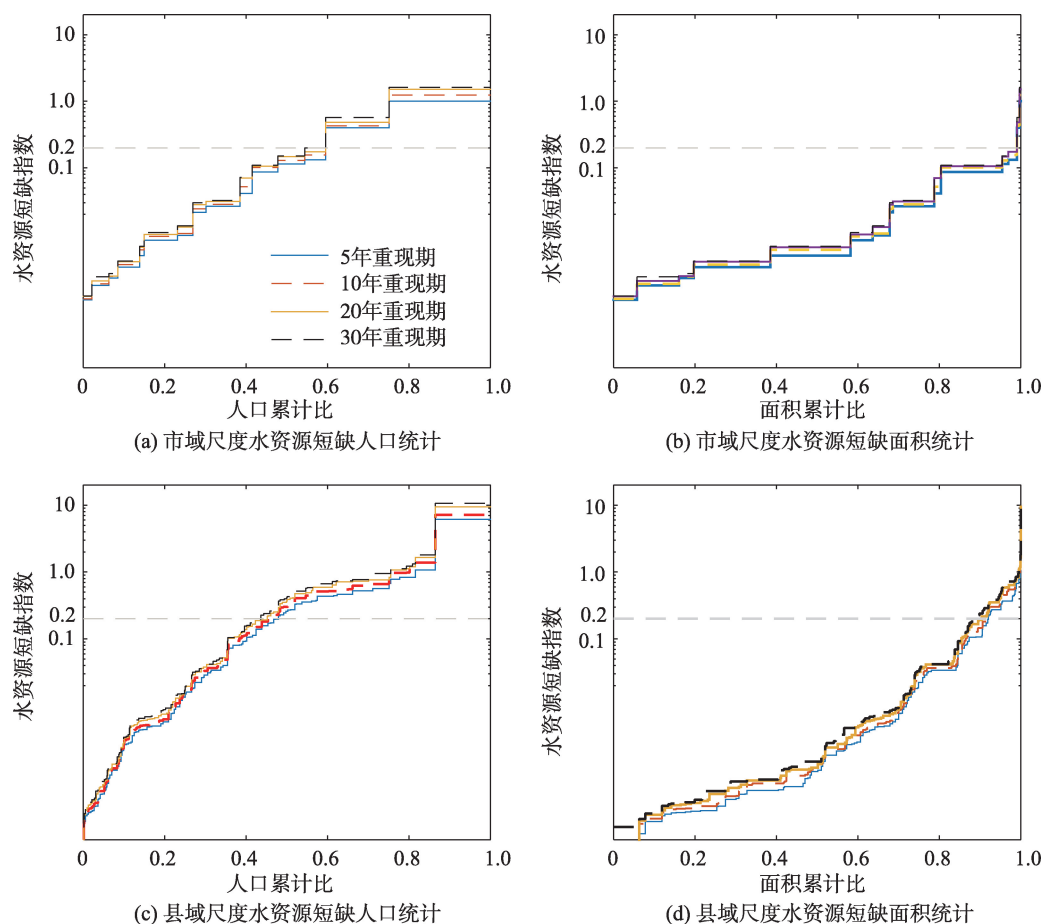
图7 青藏高原29个水资源短缺县域水资源短缺指数
Spearman秩相关系数

Fig. 7 Spearman correlation between the Water Scarcity Index values of the 29 water-scarce counties in Qinghai and Tibet

县域)的30年重现期水资源短缺指数超过0.2,面临水资源短缺。图7给出了这29个县域水资源短缺指数时间序列的Spearman秩相关系数。省区内部各县域的水资源短缺指数的秩相关程度很高,呈现出正相关关系,说明省区内部各县域同时出现水资源短缺的可能性较大,这与省区内部相邻县域相似的降水及地表径流条件有关。而青海省与西藏自治区之间各县域的水资源短缺指数的秩相关系数多分布在0左右,说明不同省区的县域同时出现水资源短缺的可能性相对随机。

3.5 水资源短缺人口与面积

图8给出了市域与县域尺度层面在不同重现期水平面临水资源短缺程度的人口和面积累计比例。不同重现期处于不同水资源短缺程度的人口(或面积)累计分布曲线很相近,重现期高的年份面临水资源短缺的人口(或面积)略高于重现期低的



注:虚线为水资源短缺指数为0.2。

图8 青海省与西藏自治区不同空间尺度处于不同水资源短缺程度的人口与面积累计分布

Fig. 8 Cumulative distributions of the water-scarce population and areas at the prefecture- and county- levels in Qinghai and Tibet

年份。就市域与县域尺度而言,青海省与西藏自治区30年重现期面临水资源短缺人口分别占总人口的40.5%、56.4%,面临中度水资源短缺人口分别占总人口的40.5%、50.1%,面临极度水资源短缺人口分别占总人口的24.9%、38.9%;出现水资源短缺的面积分别占比总面积的1.0%、10.4%,出现中度水资源短缺面积分别占比总面积的1.0%、5.5%,出现极度水资源短缺面积分别占比总面积的0.4%、2.9%。可见,在同一重现期水平下,市域尺度层面面临水资源短缺的人口和面积均少于县域尺度层面水资源短缺的人口和面积,这与上面较大空间尺度的水资源短缺情况优于较小空间尺度的水资源短缺情况的结论一致。在同一空间尺度同一重现期水平下,面临水资源短缺人口占比远高于水资源短缺面积占比,这再次说明了青藏高原水资源短缺主要发生在少部分人口相对集中区域。

4 结论与政策建议

4.1 结论

青藏高原孕育了黄河、长江、澜沧江等国内外著名的大江大河,水资源总量丰富,但由于水资源量与用水量在空间分布不均衡,绝大多数地区水资源开发程度低,而部分人口、城镇密集地区水资源严重短缺。本研究通过比较各重现期省区、市域、县域尺度层面的水资源短缺程度,分析了水资源短缺在青藏高原的尺度效应。结果表明,由于可利用水资源量与用水量皆呈现出较大的空间差异性,青藏高原水资源短缺程度空间尺度效应明显。青藏高原在省区尺度无水资源短缺;在15个市域单元中,有3个市域单元出现水资源短缺;在115个县域单元中,有29个县域呈现出不同的水资源短缺,水资源短缺县域主要集中在青海省的河湟谷地、柴达木盆地与西藏自治区的一江两河流域等人口、城镇聚集区。在县域尺度,青藏高原地区水资源短缺状况较市域与省区尺度严重,青海省与西藏自治区30年重现期面临水资源短缺人口分别占总人口的40.5%、56.4%,出现水资源短缺的面积分别占比总面积的1.0%、10.4%。县域之间水资源短缺指数的秩相关程度计算结果显示,省区内部各县域同时出现水资源短缺的可能性较大,而青海省与西藏自治区之间各县域同时出现水资源短缺的可能性相对随机。

4.2 政策建议

为促进青藏高原城镇化与社会经济的可持续发展,相关水资源利用管理政策建议如下:

(1)青海省与西藏自治区总体水资源丰富,局部性缺水严重,水资源与人口、产业分布严重不匹配。在未来城镇发展、农业、工业布局时,应充分考虑水资源承载力因素的影响,在水资源短缺地区,推进节约用水,全面实行最严格的水资源管理制度,建立基于水耗的产业准入与退出机制,控制高耗水农业与工业的发展,促进水资源与社会经济、生态环境协调发展。

(2)加强基础水利工程建设,在流域之间实施水资源调配工程,缓解人口与城镇密集地区水资源短缺。实施引水、提水工程,解决城镇和农村地区生活与生产的工程性缺水问题。在保障亚洲水塔功能的前提下,适度开发水资源丰富、开发程度低地区的水资源,包括修建水电工程、适度发展农牧业、适度向水资源短缺地区调水,以保障青藏高原城镇化进程顺利推进,促进社会经济发展。

(3)由于省区内部各县域同时发生水资源短缺的可能性较大,应考虑多县域同时发生水资源短缺的可能性,规划多地同时干旱时的备用水资源,加强青藏高原流域水资源的统一管理,保障青藏高原水资源安全。

(4)青藏高原的水资源是构建国家高原生态安全屏障的重要基石,也是国家重要的战略储备资源。建立完善的水源涵养生态补偿机制,通过市场手段解决西藏地区水资源保护与利用中存在的矛盾问题^[29],保护水塔功能,保障国家的水生态安全,促进江河源区与下游地区经济社会的协调发展。

参考文献(References):

- [1] 唐志光,李弘毅,王建,等.基于多源数据的青藏高原雪深重建[J].地球信息科学学报,2016,18(7):941-950. [Tang Z G, Li H Y, Wang J, et al. Reconstruction of snow depth over the Tibetan Plateau based on multi-source data[J]. Journal of Geo-information Science, 2016,18(7):941-950.]
- [2] 杨珂含,姚方方,董迪,等.青藏高原湖泊面积动态监测[J].地球信息科学学报,2017,19(7):972-982. [Yang K H, Yao F F, Dong D, et al. Spatiotemporal monitoring of lake area dynamics on the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geo-information Science, 2017,19(7):972-982.]
- [3] 鲁春霞,谢高地,成升魁,等.青藏高原的水塔功能[J].山地学报,2004,22(4):428-432. [Lu C X, Xie G D, Cheng S K, et al. The Tibetan Plateau as water tower[J]. Journal of

- Mountain Science, 2004,22(4):428-432.]
- [4] 青海省水利厅.青海省水资源公报[R].2015. [Department of Water Resources of Qinghai Province. Qinghai Water Resources Bulletin 2015[R]. 2015.]
- [5] 西藏自治区水利厅.西藏自治区水资源公报[R]. 2015. [Department of Water Resources of Tibet Autonomous Region. Tibet Water resources Bulletin 2015[R]. 2015.]
- [6] 中华人民共和国水利部.中国水资源公报[R].1997-2016. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China Water Resources Bulletin 1997-2016[R]. Beijing:1997-2016.]
- [7] 刘天仇,其美多吉.青藏高原国际河流区水资源特征及开发利用前景[J].地理学报,1999,54(增刊):11-20. [Liu T C, Qimeiduoji. Characteristics development and utilization prospects of water resources of the international river area in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 1999,54(sup):11-20.]
- [8] 伍文华.青海省水资源现状评价及对策建议[J].水利规划与设计,2017(9):35-36. [Wu W H. Water resources assessment and policy application in Qinghai Province[J]. Water Resources Planning and Design, 2017(9):35-36.]
- [9] 卓玛措,冯起,李锦秀.青海河湟地区水资源综合开发与区域经济发展研究[J].干旱区资源与环境,2007,21(2):95-99. [Zhuo M, Feng Q, Li J. Regional economy of Hehuang Areas in Qinghai[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007,21(2):95-99.]
- [10] 达娃.西藏地区水资源利用分析[J].长江科学院院报, 2010,27(3):74-78. [Da W. Analysis of Water Resources Utilization in Tibet[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010,27(3):74-78.]
- [11] United Nations. Sustainable Development Goals: 17 Goals to Transform Our World[R]. United Nations. 2015.
- [12] Hanasaki N, Fujimori S, Yamamoto T, et al. A global water scarcity assessment under Shared Socio-economic Pathways - Part 2: Water availability and scarcity[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2013,17:2393-2413.
- [13] Jaeger W K, Plantinga J, Chang H, et al. Toward a formal definition of water scarcity in natural-human systems[J]. Water Resources Research, 2013,49(7):4506-4517.
- [14] Liu J, Gosling S, Kumm M, et al. Water scarcity assessments in the past, present, and future[J]. Earth's Future, 2017,5:545-559.
- [15] Falkenmark M, Lundqvist J, Widstrand C. Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches[J]. Natural Resources Forum, 1989,13:258-267.
- [16] Falkenmark M. Meeting water requirements of an expanding world population[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences, 1997,352:929-936.
- [17] Schewe J, Heinke J, Gerten D. Multimodel assessment of water scarcity under climate change[C]. Proceedings of the National Academy of Sciences USA, 2014,111:3245-3250.
- [18] Savenije G. Water scarcity indicators: The deception of the numbers[J]. Physics and Chemistry of the Earth B, 2000,25(3):199-204.
- [19] Sullivan C A, Meigh J R, Giacomello A M. The water poverty index: Development and application at the community scale[J]. Natural Resources Forum, 2003,27:189-199.
- [20] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, et al. The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard[R]. 2011, Earthscan, London, U K; Washington, D C.
- [21] Liu J, Liu Q, Yang H. Assessing water scarcity by simultaneously considering environmental flow requirements, water quantity, and water quality[J]. Ecological Indicators, 2016,60:434-441.
- [22] Zeng Z, Liu J, Savenije G. A simple approach to assess water scarcity integrating water quantity and quality[J]. Ecological Indicators, 2013,34:441-449.
- [23] Mekonnen M, Hoekstra A. Four billion people facing severe water scarcity[J]. Sciences Advances, 2016,2(2): e1500323.
- [24] 廖强,张士锋,陈俊旭.北京市水资源短缺风险等级评价与预测[J].资源科学,2013,35(1):140-147. [Liao Q, Zhang S F, Chen J X. Risk assessment and prediction of water shortages in Beijing[J]. Resources Science, 2013,35(1):140-147.]
- [25] 许应石,李长安,张中旺,等.湖北省水资源短缺风险评价及对策[J].长江科学院院报,2012,29(11):5-10. [Xu Y S, Li C A, Zhang Z W, et al. Risk assessment and countermeasures of water shortage in Hubei Province[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012,29(11):5-10.]
- [26] Zhang X, Tang Q, Pan M, et al. A Long-term land surface hydrologic fluxes and states dataset for China[J]. Journal of Hydrometeorology, 2014,15:2067-2084.
- [27] Liu J Y, Kuang W H, Zhang Z X, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns, and causes of land-use changes in China since the late 1980s[J]. Journal of Geographical Sciences, 2014,24:195-210.
- [28] 国家统计局农村社会经济调查司.中国县域经济统计年鉴(县市卷) 2015[M].北京:中国统计出版社,2015. [Rural Socio-Economic survey Department of National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook for county economy 2015[M]. Beijing: China Statistics Press, 2015]
- [29] 王志强,柳长顺,刘小勇,等.关于建立西藏水生态补偿机制的设想[J].长江流域资源与环境,2015,24(1):16-20. [Wang Z Q, Liu C S, Liu X Y, et al. Several thoughts on water eco-compensation mechanism in Tibet[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015,24(1):16-20.]