

典型缺水城市多水源水质评价和水量平衡分析

严伟, 樊金红, 王红武

(同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 中国是典型的缺水国, 水资源供需矛盾已经成为制约中国经济发展的关键因素。为进一步缓解城市水资源匮乏的社会问题, 城市回用水的发展越来越受到人们的重视。首先从水质的角度, 将中水、雨水与饮用水进行比较, 再结合其作为城市杂用水、农业灌溉水、工业冷却水等水资源利用形式的不同水质要求, 探讨了中水和雨水这类低水质非常规用水的回用可行性; 再从水量的角度, 通过计算城市可替代回用水量(Q_t)、可回用中水量(Q_z)和可回用雨水量(Q_y), 以及实际回用雨水量(Q_{y1})、实际回用中水量(Q_{z1})和实际回收水量(Q_{avail}), 分析了中国几个典型缺水城市回用水在城市用水中的供需关系。结果表明: 城市中水和雨水等回用水对城市各类非接触用水有着非常好的替代作用, 目前城市对回用水的需求量远高于回用水供应量, 有着很大的发展空间。最后分析中水和雨水的利用前景及城市用水趋势, 结合现阶段城市雨污水收集发展现状, 提出对应的雨污水资源化、经济化的发展需求。

关键词: 缺水城市; 多水源; 水质评价; 中水回用; 雨水回用; 多水源水量平衡

中图分类号: TV213.9

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)05-0046-06

Water quality evaluation and water balance analysis of typical water-deficient cities with multi-sources

YAN Wei, FAN Jinhong, WANG Hongwu

(School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: China is a typical country with water shortage, and the contradiction between water supply and demand has become a key factor restricting its economic development. In order to further alleviate the social problem of urban water shortage, the development of urban water reuse has been paid more and more attention. First, the reuse feasibility of low quality water such as reclaimed water and rainwater were discussed from the perspective of water quality, by comparing with drinking water, and combining with different water quality requirements of water resource utilization forms such as urban miscellaneous water, agricultural irrigation water and industrial cooling water. Second, from the perspective of water quantity, by calculating the Alternative Recycling Water (Q_t), available reclaimed rainwater (Q_y), available reclaimed sewage (Q_z), real reclaimed rainwater (Q_{y1}), real reclaimed sewage (Q_{z1}) and real reclaimed water (Q_{avail}), we analyzed the supply and demand relationship of reuse water in urban water consumption in several typical water-shortage cities in China. The results showed that urban reclaimed sewage-water and rainwater have a very good substitution effect on all kinds of non-contact water in the city. At present, the urban demand for reclaimed water is much higher than the supply of reclaimed water, and there is a great room for development. Finally, the utilization prospect and trend of urban water use of reclaimed sewage-water and rainwater are analyzed, and the development demand of rainwater-sewage resources and economy is put forward based on the current development status of urban rainwater-sewage collection.

Key words: water shortage city; multi-water resource; water quality assessment; reclaimed water reuse; rainwater reuse; water balance of multi-sources

收稿日期: 2019-03-20; 修回日期: 2019-05-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0403405-002)

作者简介: 严伟(1994-), 男, 浙江衢州人, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向为污水处理与资源化。

通讯作者: 樊金红(1978-), 女, 山东成武人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为污水处理技术与理论。

1 研究背景

水资源短缺已从环境危机上升为社会危机^[1],成为制约社会经济发展的瓶颈^[2-3],且在遭遇极端干旱的天气情况下,城市水资源压力会急剧增大,对城市发展造成严重影响^[4]。国内外研究者一直都在探求适应国情的水资源可持续利用方式^[5-6],如韩淑颖等^[7]系统总结了“一带一路”沿线国家在水资源管理工作中的经验,以期为全球国家的水资源管理提供借鉴。从1983年起,我国的城市节水工作在适应经济建设发展和人民生活改善等方面取得了明显的成效,在水资源开发、利用、治理的同时更加重视对水资源的配置、节约和保护^[8]。现今,对于城市水资源的利用,已经不能简单地从自然界中索取,而是需要充分利用城市可利用水资源,如中水(系指城市污水经处理达到规定的水质标准、可在一定范围内重复利用的非饮用水)和雨水等城市再生水资源的利用都是需要去探求^[9-10]。廖朝轩等^[11]通过对国外雨水管理措施的总结,鼓励国家积极引进国外先进的水循环体系概念,加快国家海绵城市建设;深圳市光明新区更是创建了国内首个低影响开发雨水综合利用示范区^[12]。此外,由于中水利用的经济效益明显^[13],中水回用系统正在逐步走进高校^[14]、小区^[15]和酒店^[16],从而在一定程度上缓解了城市市政用水的供水压力。近年来,对中水和雨水回用的分析和应用的热潮高涨,高晶^[17]通过软件分析建立了雨水水质安全评价模型,用来评价降雨径流中的水质污染状况;王小林等^[18]通过对西安市不同下垫面的雨水径流的水质分析,认为屋面雨水具有极大的收集利用潜势;曹亚辉^[19]通过对华北电力大学中水回用系统的研究表明,该系统每天可供应1 000 m³以上的回用中水,能有效地补充校内用水^[19]。然而这些研究都过于侧重雨水或者中水回用的单方面评价,且讨论的大多是社区、学校等小范围区域,对于将雨水收集和中水回用综合水质分析以及在城市范围内进行回用水量供需分析的研究较少。

本文通过多水源(饮用水、中水和雨水)水质的综合评价,旨在更好地揭示中水与雨水回用的科学性,提高居民对回用水的接纳度,并通过城市回用水的供需平衡和发展趋势分析,为促进水资源的优化配置、缓解水资源危机和支撑社会经济的可持续发展提供新的水资源利用方案。

2 城镇多水源水质评价

2.1 自来水

一直以来,自来水作为我国居民的主要用水,在生活和工业上都有广泛的应用。由于自来水需作为居民饮用水使用,因而对其水质要求相当严格,其制作成本非常昂贵,制作流程也极为繁杂^[20]。根据《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2006),饮用水供水中COD含量不超过5 mg/L,氨氮含量不超过0.5 mg/L,浊度不超过1。为了满足人们健康的需要,其水质要求远高于城市杂用水、农业灌溉水、工业冷却水等。但是根据调查,滥用饮用水的情况普遍存在于人们日常的生活生产之中,在居民日常非接触用水和绿化及消防等城市杂用水、农业灌溉及工业用水中普遍存在以自来水作为水源的现象,导致大量饮用水的浪费,并产生大量废水。研究表明,30%以上的居民非接触生活用水、60%以上的非生产性工业用水以及几乎全部的灌溉用水均可用回用水替代^[21]。

2.2 中水

城市污水的再利用是节约及合理利用水资源的有效途径,也是防治水环境污染、促进城市可持续发展的一个重要方面,还是水资源良性循环的重要保障措施^[22]。中水是城市污水经处理设施深度净化处理后的水的统称,其水质介于清洁水(上水)与排入管道内的污水(下水)之间^[23],其水质可相当于城市污水处理厂出水的A级标准,其主要指标COD、总氮和总磷含量分别不超过50、15和1mg/L。通过中水水质与其他水资源利用水质对比可知:中水的水质标准远达不到饮用水供水标准,不能作为饮用水来源,但其水质基本符合农业灌溉水和工业冷却水(除浊度和余氯外)的水质要求,可以用来作为农业和工业的替代水使用;若将中水经过一定处理,进一步除去臭味、溶解性固体等也可达到城市杂用水水质要求^[24]。因此,中水回用有非常可观的经济价值,在国外也已经得到了广泛的应用,通过特定的中水输送管道,将其应用到工业、农业、景观、消防等方面。

2.3 雨水

雨水是一种污染程度较低、数量巨大且分布较为广泛的水资源。根据有关研究报道,天然雨水的水质较好,其COD的含量可达到为20~50 mg/L,悬浮颗粒物SS的含量不超过100 mg/L,总氮含量不超过1.00 mg/L,总磷含量一般不超过0.20

mg/L^[25-26]。但是在城市雨水收集时,由于街道、排水沟、屋面等含有一定的污染物,所以收集后的雨水含有较多的SS和COD,其含量随城市环境污染情况而不同。但是混有这类污染物的雨水(尤其是除去初期雨水后)在经过贮水池里的基本处理之后,很容易就可以得到较为纯净的符合城市杂用水水质要求的可回用水^[27-29]。由此可见,雨水是可以作为城市回用水来进行使用的,并且由于其天然性和循环性,具有广阔的开发前景。

3 多水源用水量供需平衡分析

3.1 用水量供需计算

3.1.1 数据来源 通过查询政府发布的历年的《水资源公报》,获得上海、青岛、北京和西安4大城市的历年用水量、年降水量、年污水处理量等数据,进而计算各城市的可替代回用水量(Q_t)、可回收中水量(Q_z)和可回收雨水量(Q_y)。

3.1.2 计算公式

(1)城市可替代回用水量以城市用水量中可采用的再生水和雨水回用量来计算^[30],其计算公式如下:

$$Q_t = Q_{gy} \cdot m + Q_{sh} \cdot n_1 + Q_{gg} \cdot n_2 + Q_{ny} + Q_{st} \quad (1)$$

式中: Q_t 为城市可替代回用水量, $10^8 \text{ m}^3/\text{a}$; Q_{gy} 为城市工业用水量, $10^8 \text{ m}^3/\text{a}$; Q_{sh} 为城市生活用水量, $10^8 \text{ m}^3/\text{a}$; Q_{gg} 为城市公共用水量, $10^8 \text{ m}^3/\text{a}$; Q_{ny} 为农业用水量, $10^8 \text{ m}^3/\text{a}$; Q_{st} 为生态环境用水量, $10^8 \text{ m}^3/\text{a}$; m 为城市工业用水中冷却水用量占比(取0.6); n_1 为城市生活用水中冲洗厕所用水占比(取0.3); n_2 为城市公共用水中市政杂用水占比(取0.12)。

(2)城市可回收雨水量以当地的降雨量进行计算,其计算公式如下:

$$Q_y = \Psi \cdot \alpha \cdot \beta \cdot A \cdot h \cdot 10^{-5} \quad (2)$$

式中: Q_y 为城市可回收雨水量, $10^8 \text{ m}^3/\text{a}$; Ψ 为地表径流系数; α 为降雨量季节折减系数; β 为初期雨水

的弃流系数; A 为集雨面积(以陆地面积计), km^2 ; h 为年平均降雨量,mm。

(3)城市可回用中水量以城镇污水处理量进行计算,其计算公式可采用公式(3)或(4)的其中之一:

$$Q_z = t \cdot Q_r \cdot 10^{-8} \quad (3)$$

$$Q_z = \mu \cdot \varphi \cdot Q_{sh} \quad (4)$$

式中: Q_z 为城市可回收中水量, $10^8 \text{ m}^3/\text{a}$; t 为污水处理厂的年平均运行天数,d; Q_r 为城镇日均污水处理量, m^3/d ; μ 为居民生活用水变为生活污水的转化率; φ 为生活污水处理效率。

3.2 多水源供需平衡分析

根据公式(1)~(4)及上海、青岛、北京和西安4城市的《水资源公报》数据,再结合各市年污水处理量数据,计算各城市的可替代回用水量(Q_t)、可回收雨水量(Q_y)和可回收中水量(Q_z)的值,将计算结果和各类用水量统计列于表1。

3.2.1 “可供”大于“需” 上海是水资源丰富的城市(水质型缺水)^[31],其工业用水量明显高于北京、青岛和西安(资源性缺水),由表1可知,4个城市的年可回收水量明显高于年可替代回用水量,具有非常可观的水资源利用前景,尤其是青岛市,可回用水量 Q_{avail} (指可回用雨水量 Q_y 和可回用中水量 Q_z 的总和)更是超过 Q_t 的6倍,这主要是因为青岛市年用水量较少,而且地域比较辽阔,其可回收雨水量相对较多。而上海市可回用水量却仅是稍多于可替代回用水量,这是因为上海人口密集,而且工业发达,工业用水量占了年用水量的45%以上。从理论上讲,若将可替代回用水量(Q_t)定义为“需”,即需要回用水的量,再将可回用水量(Q_{avail})定义为“供”,即可以供给的回用水量,则从表1的数据可以看出,目前上海、青岛、北京和西安4城市的回用水呈现出“供”大于“需”的情势^[32-33]。

表1 4个典型城市年用水及回用水量统计表

城市	缺水类型	需水					供水			
		年用水量 Q_{total}	工业用水 量 Q_{gy}	居民生活用 水量 Q_{sh}	城镇公用 水量 Q_{gg}	农业和生态用 水量 $Q_{ny} + Q_{st}$	可替代回 用水量 Q_t	可回用雨 水量 Q_y	可回用中 水量 Q_z	可回用水 量 Q_{avail}
上海	水质性	76.03	35.09	13.23	11.34	16.37	41.57	24.15	19.01	43.16
青岛	资源型	9.44	2.14	3.16	1.07	3.06	5.43	27.15	7.37	34.52
北京	资源型	38.80	3.80	17.80		17.20	24.82	45.23	13.10	58.33
西安	资源型	18.20	4.20	4.25	1.28	8.47	12.42	26.73	2.72	29.45

3.2.2 “实供”不应“实需” 在上述可回收雨水和中水的量的计算中,是按城市面积和集雨面积换算的回收雨水量和按污水处理厂的处理水量为基准计算的可用回用中水量。然而在实际应用中,无法将集雨面积做到百分之百,且小区中中水的处理回用率也未能达到百分之百。

实际上有数据显示,目前国内城市雨水收集效率较低,仅为 10%,而我国社区中水回用率大约为 30%,故在计算可用回用雨水量时须再乘以雨水收集效率 η_1 ,在计算实际可用回用中水量时须再乘以中水回用率 η_2 。以此为依据重新计算实际回用雨水量 (Q_{y1})、实际回用中水量 (Q_{z1}) 和实际回收总水量 (Q_{avail1}),计算结果如表 2 所示。由表 2 可见,若将可替代回用水量 (Q_t) 定义为“实需”,实际回用水量 (Q_{avail1}) 定义为“实供”,则 4 个城市均呈现出“实供”不应“实需”的情势。

限制中水和雨水开发利用的因素主要有两个,即基础设施建设成本和回用水的社会接受程度。雨水收集是一个庞大工程,不仅仅是技术难题更是经济难题。要充分利用城市雨水和中水,就必须解决

城市集雨设施建设和社区中水回用的技术等关键性难题,让“实供”满足“实需”^[34]。

表 2 典型城市实际可回用水量统计表 $10^8 \text{ m}^3/\text{a}$

城市	缺水类型	需水		供水	
		可替代回用水量 Q_t	实际回用水量 Q_{y1}	实际回用中水量 Q_{z1}	实际回用总水量 Q_{avail1}
上海	水质性	41.57	2.415	5.703	8.118
青岛	资源型	5.43	2.715	2.211	4.926
北京	资源型	24.82	4.523	3.930	8.453
西安	资源型	12.42	2.673	0.816	3.489

3.3 用水趋势分析及多水源利用前瞻

3.3.1 用水趋势 2012 - 2017 年上海、青岛、北京和西安 4 城市的用水量及可替代回用水量变化数据统计如图 1 所示。由图 1 可知,近年来虽然上海和青岛市的总用水量和可替代回用水量略有波动,但各市用水量总体上是以平缓的速度增长,且各市年可替代回用水量均达到年总用水量的 50% 以上,并在逐渐增长。

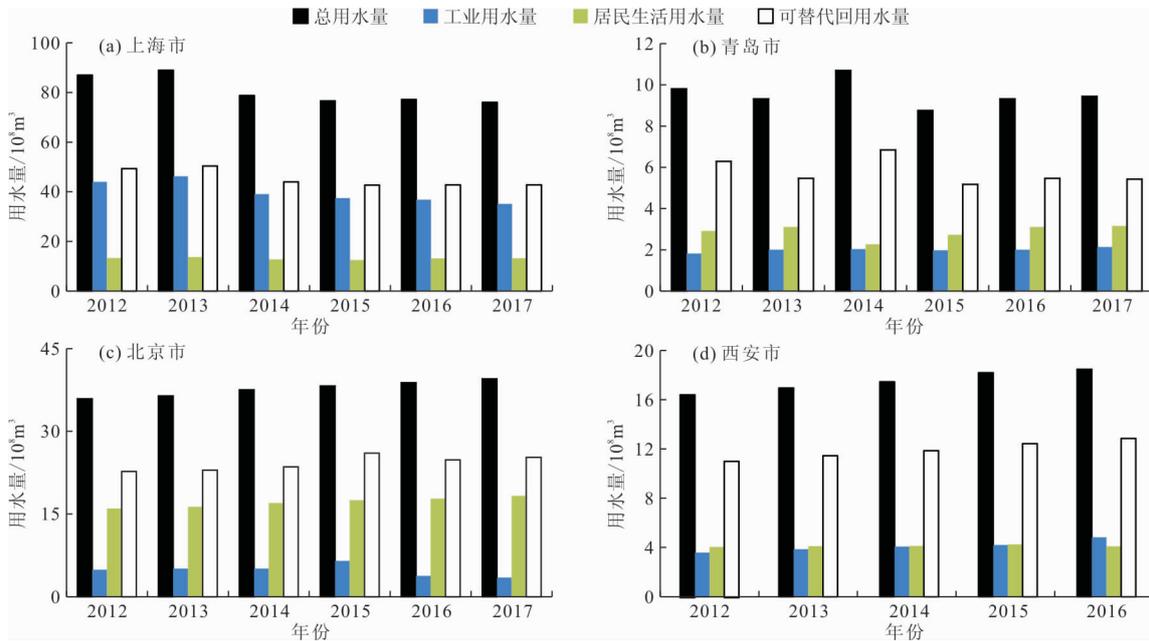


图 1 2012 - 2017 年 4 个城市用水量及可替代回用水量变化图

3.3.2 多水源利用前瞻 雨水收集利用的出发点是解决城市用水紧张的问题,其本身也有着极其可观的水资源应用前景,是解决城市水危机的重要途径。在实际应用中它还有着改善城市雨水利害关系失衡的作用,通过雨水回用可减轻城市排水管道的负荷,提高已建设管道的利用率;并通过雨水收集设施缓解城市的内涝灾害,以达到“需时我用,不需我

存”的效果^[35-36],在协调城市水资源与水环境的关系的同时能为城市发展带来可观的经济效益^[29]。

要进一步开展雨水资源化利用,离不开城市雨水资源化系统的设计和工程应用,从不同下垫面雨水利用、初期雨水弃流、收集蓄存到最后的处理使用等一系列机电设备和构筑物建设,都需要更多的社会投入。此外,现阶段非常热门的海绵城市建设设计

划的本质也是雨水的优化利用,将两者有机地结合在一起,以推进城市雨水集聚建设的发展^[37]。另外,城市的发展须建立城市雨污水资源化体系,要在城市建设过程中充分考虑雨污水收集和优化处理。

城市社区雨污水资源化系统建设的核心是转变用水方式、提高用水效率,进而弥补传统集中式供排水系统“稀释收集-远程输送-集中处理”耗水耗能的问题,其本质就是雨水和中水的优化利用。而实现社区内雨污水资源化的关键除了雨水和中水的收集,还有社区内水质保障、居民对非常规水源的科普认知以及经济可适应问题^[38]。雨水和中水回用的可行性关键在于其经济性,因此对于这类低水质供水,应考虑其对现阶段水价结构的影响,设立合理的水价体系,在经济层面明确其与现行的自来水供应体系的区别。

4 结 论

本文通过城市各类水资源的水质评价和利用形式分析,结合上海、青岛、北京和西安4个城市回用水需求和供应现状计算,探讨了非常规水资源在城市发展过程中的价值和利用前景。

(1)城市中水和雨水水质标准远达不到饮用水供水标准,但可用作城市杂用水、非接触生活用水、工业冷却水和农业用水等的替代用水,具有广泛的利用前景。

(2)计算相应的城市可替代回用水量(需)、可回用水量(可供)和实际可回用水量(实供),进而分析供需关系可知,就城市回用水资源而言,上海、青岛、北京和西安4个城市都处于“可供”大于“需”的情况,但就实际回用水的使用情况而言,这些城市都属于“实供”不应“实需”。

(3)统计2012-2017年上海、青岛、北京和西安4个城市的总用水量和可替代回用水量可知,各地年可替代回用水量均达到年总用水量的50%以上,并在逐渐增长,需求前景明确。

(4)未来发展中若要充分利用雨水和中水,城市建设须不断完善自身的回水回用设施和雨水收集装置等关键技术难题,同时完善中水、雨水等非常规用水相关管理政策,让“实供”满足“实需”,同时实现低水质供水的经济适用性。

参考文献:

[1] 陈祖军,李珺,谭显英.上海城市水资源发展战略研究[J].中国给水排水,2018,34(2):24-30.

- [2] 李杉.论述水资源利用与环境经济协调发展[J].资源节约与环保,2018(12):158.
- [3] 章林伟.中国海绵城市建设与实践[J].给水排水,2018,54(11):1-5.
- [4] 陆咏晴,严岩,丁丁,等.我国极端干旱天气变化趋势及其对城市水资源压力的影响[J].生态学报,2018,38(4):1470-1477.
- [5] 徐学良.城市水资源利用及其用水需求预测[J].中国资源综合利用,2017,35(8):50-51+57.
- [6] TSAKIRIS G. The status of the European waters in 2015: a review[J]. Environmental Processes, 2015,2(3):543-557.
- [7] 韩淑颖,马军霞,王鑫,等.“一带一路”欧洲区水资源管理发展历程及启示[J].水资源保护,2018,34(4):29-34.
- [8] 姜影,薛祥山,周影烈,等.水资源优化配置城市供水体系建设探析——以四川省邛崃市为例[J].水利规划与设计,2019(1):31-33+45.
- [9] 郭雷,胡婵娟,高红莉,等.城市雨水利用现状、问题及对策[J].河南水利与南水北调,2018,47(11):37-38.
- [10] 李勇,刘静,王文鹏.中水回用技术发展现状及存在问题探讨[J].绿色科技,2018(2):49-50.
- [11] 廖朝轩,高爱国,黄恩浩.国外雨水管理对我国海绵城市建设的启示[J].水资源保护,2016,32(1):42-45+50.
- [12] 胡爱兵,任心欣,俞绍武,等.深圳市创建低影响开发雨水综合利用示范区[J].中国给水排水,2010,26(20):69-72.
- [13] 王丹,王然,刘航飞.中水回用与效益分析[J].环境保护与循环经济,2013,33(12):33-36.
- [14] 赵海东.中水回用在大学校园的应用研究[J].辽宁化工,2016,45(12):1523-1525+1534.
- [15] 黄雯.居住小区中水综合利用优化设计研究[D].西安:长安大学,2017.
- [16] 杨颖.酒店中水回用工程综合效益评价研究[D].西安:西安建筑科技大学,2015.
- [17] 高晶.不同下垫面降雨径流水质安全评价[D].天津:天津理工大学,2018.
- [18] 王小林,余李鑫,王旭东,等.西安市不同下垫面雨水水质分析及道路雨水利用设计[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2017,49(4):555-560.
- [19] 曹亚辉.华北电力大学中水回用技术分析与研究[D].北京:华北电力大学,2012.
- [20] 王征.浅谈自来水厂清洁生产审核[J].城镇供水,2018(6):79-82+36.
- [21] 蔡培.中水回用于电厂循环水系统的水处理药剂的评价[J].南京工业大学学报(自然科学版),2018,40(5):124-130.
- [22] Markus Tibbetts(马进).上海市水资源利用模式可持续性定量研究[D].上海:复旦大学,2011.

- [23] 李立铮. 上海市非常规水源利用现状及发展对策[J]. 中国水利, 2017(11):11-13.
- [24] 刘月玲. 谈城市中水回用[J]. 山西建筑, 2013, 39(20):115-118.
- [25] 胡坤. 城市区域内雨水水质评价及其利用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [26] 车伍,刘燕,李俊奇. 国内外城市雨水水质及污染控制[J]. 给水排水,2003,29(10):38-42.
- [27] 高习伟,姜允芳. 上海市1971-2010年降水时空变化特征[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(6):48-53, 60.
- [28] 王文佳. 基于“节水优先”的上海市用水量变化趋势分析及预测[D]. 上海:华东师范大学. 2018.
- [29] 那健. 城市雨水利用模式研究与工程示范[D]. 西安:西安理工大学. 2017.
- [30] 段涛,刘晓君. 城市再生水的需求分析[J]. 生态经济, 2007(4):151-153.
- [31] 顾圣华. 上海市水资源特征[J]. 水文, 2002,22(5):40-43.
- [32] 孙素艳,李云玲,郭东阳,等. 河北省供用水现状及水资源平衡分析[J]. 水利规划与设计, 2018(10):62-67.
- [33] 张聪宇. 青岛市水资源供需预测与利用研究[J]. 中国高新技术企业, 2016(15):123-124.
- [34] 朱永彬,史雅娟. 中国主要城市水资源价值评价与定价研究[J]. 资源科学, 2018,40(5):1040-1050.
- [35] 宋进喜,李怀恩,李琦. 城市雨水资源化及其生态环境效应[J]. 生态学杂志, 2003,22(2):32-35.
- [36] 袁再健,梁晨,李定强. 中国海绵城市研究进展与展望[J]. 生态环境学报, 2017,26(5):896-901.
- [37] 张思源. 基于海绵城市的城市绿地系统设计与应用[J]. 低碳世界, 2018(12):192-193.
- [38] 朱永彬,史雅娟. 中国主要城市水资源价值评价与定价研究[J]. 资源科学, 2018,40(5):1040-1050.

(上接第45页)

- [7] 吴志杰,何国金,黄绍霖,等. 南方丘陵区植被覆盖度遥感估算的地形效应评估[J]. 遥感学报,2017,21(1):159-167.
- [8] 袁道先. 西南岩溶石山地区重大环境地质问题及对策研究[M]. 北京:科学出版社,2014.
- [9] 熊康宁,李晋,龙明忠. 典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题[J]. 地理学报,2012,67(7):878-888.
- [10] WU Xiuchen, LIU Hongyan, LI Xiaoyan, et al. Differentiating drought legacy effects on vegetation growth over the temperate Northern Hemisphere[J]. Glob Change Biol, 2017,24(1):1-13.
- [11] SEN, KUMAR P. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau[J]. Journal of the American Statistical Association, 1968,63(324):1379-1389.
- [12] 王文圣,丁晶,李跃清. 水文小波分析[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [13] MANN H B. Nonparametric test against trend[J]. Econometrica, 1945,13(3):245-259.
- [14] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京:高等教育出版社,2002.
- [15] 张雪梅,王克林,岳跃民,等. 生态工程背景下西南喀斯特植被变化主导因素及其空间非平稳性[J]. 生态学报,2017,37(12):4008-4018.
- [16] 马士彬,安裕伦,杨广斌. 喀斯特地区不同植被类型NDVI变化及驱动因素分析——以贵州为例[J]. 生态环境学报,2016,25(7):1106-1114.
- [17] 童晓伟,王克林,岳跃民,等. 桂西北喀斯特区域植被变化趋势及其对气候和地形的响应[J]. 生态学报,2014, 34(12):3425-3434.
- [18] 何云玲,李同艳,熊巧利,等. 2000-2016年云南地区植被覆盖时空变化及其对水热因子的响应[J]. 生态学报,2018,38(24):8813-8821.
- [19] 祝聪,彭文甫,张丽芳,等. 2006-2016年岷江上游植被覆盖度时空变化及驱动力[J]. 生态学报,2019,39(5):1583-1594.