



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.05.005

卫文, 陈宗宇. 气候变化情景下的地下水潜在补给变化影响分析——以栾城试验站为例[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(5): 29-35, 42. WEI Wen, CHEN Zongyu. The effects of climate change on potential groundwater recharge—A case study of Luancheng experimental station[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(5): 29-35, 42. (in Chinese)

气候变化情景下的地下水潜在补给变化影响分析

——以栾城试验站为例

卫文, 陈宗宇

(中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061)

摘要: 了解气候变化影响下的地下水潜在补给变化对于地下水资源的科学管理与评价是非常必要的。以栾城生态试验站为典型研究区, 联合应用 ClimGen 天气发生器和地下水补给 Visual HELP 模型, 对未来气候变化情景下的地下水潜在补给速率进行了评估。结果显示: 在降水减少 10% (P)、温度上升 2 °C (T) 以及两者同时发生 (P&T) 三种情景下, 未来 (2011 年-2040 年) 地下水多年平均补给速率相比基准 (1961 年-1990 年) 分别下降了 23.33%、4.42%、26.01%, 其中降水的减少对地下水入渗补给的影响尤为明显。该项研究对于指导地下水资源的科学管理与可持续开发利用具有重要意义。

关键词: 气候变化情景; 潜在补给; 天气发生器; HELP 模型; 地下水资源管理

中图分类号: P641.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)05-0029-07

The effects of climate change on potential groundwater recharge —A case study of Luancheng experimental station

WEI Wen, CHEN Zongyu

(Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China)

Abstract: Understanding the effects of climate change on potential groundwater recharge is considerably vital for the scientific management and evaluation of groundwater resources. This study combined the climate generator (ClimGen) with groundwater recharge model (Visual HELP) to assess the potential groundwater recharge rate under 3 assumed future climate scenarios (10% decrease in precipitation (P), 2 °C increase in temperature (T), and both occurring simultaneously (P&T)) in Luancheng ecological experimental station. The results indicated that the future (2011-2040) multi-year mean recharge rates in these three scenarios would decrease by 23.33%, 4.42%, and 26.01% respectively compared to the baseline (in 1961-1990). The reduction in precipitation had an especially significant effect on groundwater infiltration recharge. This study has important significance in guiding the management and sustainable exploitation of groundwater resources.

Key words: climate change scenario; potential recharge; climate generator; HELP model; groundwater resources management

华北平原是我国重要的粮食、能源生产基地之一, 地下水资源是当地社会经济可持续发展的重要

基础保障。自 20 世纪 70 年代开始,对地下水资源的过量开采已引起一系列生态环境地质问题^[14]。近几十年来,以全球气候变暖为主要特征的华北区域水文循环特征产生了较大变化^[5,8],降水入渗补给作为华北山前平原地下水的主要补给来源之一^[9-12],已明显受到气候变化直接(降水)和间接(如,温度、地下水开采量等)的影响。目前已有的调查评价成果及制定地下水开发利用策略的依据主要是基于现状气候条件下的地下水资源更新能力评价^[13],对于未来气候条件下的地下水补给研究相对较少,这势必会对地下水资源的科学准确评价造成一定的影响。因此,本文以华北山前平原栾城试验站为例,应用天气发生器 CLIMGEN 模型模拟未来气候变化情景,并评价三种气候变化情景下地下水补给发生的变化,这对于地下水资源的科学管理与可持续开发利用具有重要指导意义。

1 研究区概况

研究区位于华北山前倾斜平原滹沱河冲洪积扇,地理坐标范围为 E114°2′ - 115°5′, N37°4′ - 38°5′(图 1)。地形起伏不大,西部山前坡度约 4%~6%,其他地区小于 2%。气候属暖温带半干旱季风气候区,区内多年平均气温为 13.5℃,多年平均降水量为 527.6 mm,降水多集中在 6 月 - 9 月,占全年降水量的 75%左右。滹沱河是研究区内主要河流,近些年来已基本干涸。降水入渗是该区地下水的主要补给来源,占总补给量的 45%~64%^[14]。区内包气带岩性多由层状非均质黄色、黄褐色亚砂土、粉细砂、中粗砂及亚黏土等组成,降水入渗系数为 0.2~0.4。其下伏含水层为第四系松散沉积物,岩性以粗砂、砾石、卵石为主,含水层垂向连续性好,从西部山前向东部,含水层介质颗粒由粗变细,总厚度为 10~40 m,导水系数在西部山前为 1 000~5 000 m²/d,东部为 100~300 m²/d^[13]。

本次研究场地选取为中国科学院栾城生态试验站,该站位于滹沱河山前冲积扇平原上,距石家庄市东南约 25 km 的栾城县,地理坐标为 N37°53′, E114°41′,海拔 50.1 m,占地面积约为 28 万 m²,位置见图 1。地下水动态变化主要受大气降水、灌溉水入渗和农业开采的影响。近年来,随着开采规模的不断扩大,地下水位急剧下降,区内浅层地下水位最大埋深达 33 m,地下水位多年平均年下降速率约为 0.7 m/a,其中农业开采已成为影响地下水位变化的决定因素^[15]。降水入渗补给是该区地下水的主要补给方式,研究气候变化(气温和降水)情景下

的地下水补给变化,可为地下水资源评价及合理开发利用提供重要科学依据。



图 1 研究区地理位置

Fig. 1 The location of the study area

2 ClimGen 天气发生器

2.1 模型简介

天气发生器是气候变化影响评价的重要工具之一,在气候及极端事件模拟、SWAT 模型气象要素构建等方面有着广泛的应用^[16-20]。目前,比较常用的天气发生器有 WGEN^[21]、WXGEN^[22]、USCLIMATE^[23]、CLIGEN^[24]、CLIMAK^[25]、ClimGen^[26]、SCENGEN^[27]以及 LARS-WG^[28]等。其中 WGEN 模型曾经是美国应用最为广泛的天气发生器, ClimGen 模型是在 WGEN 模型基础上的修改和完善。因此,本文拟采用 ClimGen 进行研究区气象模拟。该模型能够对降水^[29],日最高和最低温度^[30],太阳辐射^[31],空气湿度和风速等参数进行模拟,详细的介绍可参阅相关文献^[32-34]。

2.2 ClimGen 在研究区的适用性

对 ClimGen 模型生成的 1961 年 - 1990 年逐日降水和气温数据进行了多年平均月值与年值统计,并与石家庄气象站 1961 年 - 1990 年间逐日观测数据(数据源自中国气象数据网, <http://data.cma.cn/>)的多年平均统计结果进行了对比(图 2),从图 2(a)中可以看出,除在降水集中的月份(5 月,7 月 - 8 月)模拟降水量与实测略有差异外(但实际上相对误差较小),其余月份均与实测统计值基本一致,模拟的降水多年平均为 549 mm,比实测值 526 mm 略偏高 4.4%;对于日最高和最低气温的模拟来说,模拟的统计结果与实际的观测记录(图 2(b))高度吻合。总的来看, ClimGen 天气发生器对于研究区的气候模拟效果良好,这表明 ClimGen 模型在研究区是适用的。

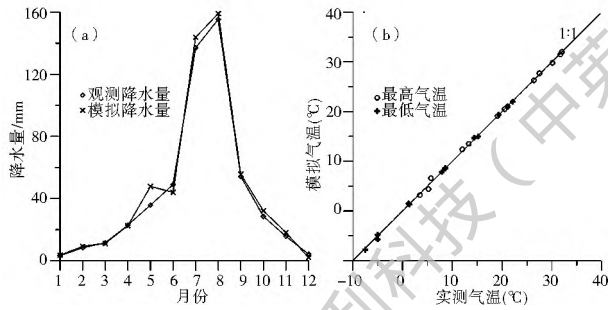


图2 ClimGen 天气发生器模拟结果与实际观测统计结果对比(1961年-1990年)

Fig. 2 Comparison between the simulation results from ClimGen and observation statistics (1961-1990)

2.3 未来气候情景模拟

对于未来气候变化的模拟,目前主要有两种途径:一种是通过降尺度(SDSM)的方法将全球大气环流模型GCMs的输出结果内插到研究区内;另一种是通过统计分析研究区的气候变化特征,并假设未来的气候条件遵循此变化规律,利用天气发生器来产生未来的气象条件。

由于研究区范围较小,本次研究采用第2种方法来构建未来气候变化情景,以研究区内石家庄气象站多年的观测数据统计特征为基础,结合前人在此地区的研究成果,例如,陈隆勋等^[35]根据中国160个站的气候资料分析结果显示华北地区20世纪80年代的平均温度比50年代升高了0.54℃;柳艳香等^[36]将IPCC温室气体排放情景输入GOALS4.0模型当中,结果显示到2030年华北地区冬季的增温幅度相比多年平均(1961年-1990年)上升了2.5℃左右;赵少华等^[37]利用Hargreaves模型对河北平原49个气象台站的逐月气象资料的分析结果显示:降水年变化呈线性下降趋势,下降速率为1.67mm/a;年平均气温均呈现线性增加趋势,增温速率为0.038℃/a。从而构建了本次研究的气候变化情景(表1),应用Climgen模型生成研究区未来(2011年-2040年)的逐日气象资料。

表1 未来气候变化情景

Tab. 1 Assumed future climate change scenarios

情景	描述
基准	以1961年-1990年实测降雨、温度数据统计结果为基础
P	降水减少10%
T	温度上升2℃
P&T	降水减少10%,温度上升2℃

3 Visual HELP 模型

基于HELP的垃圾填埋场水文优化设计软件,

Visual HELP将最新版本的HELP模型与操作简便的界面和强大的绘图功能结合起来,用于构建地下水模型并评价模拟结果。

3.1 基本原理

HELP模型^[38]最初是用来评价垃圾填埋场性能的水文评价,近些年来已被有效地应用于估算地下水补给速率^[39-40]。HELP模型采用数值模拟的方法来估算地表储水、融雪、径流、入渗、蒸散发、植被生长、土壤湿度储存以及各种工程对地下水补给的影响,模型的输入要素主要包括土地利用状况、土壤类型、植被分布以及地形地貌特征等。基本原理为水量均衡,模拟的天然水均衡成分包括降水、叶面截留、叶面蒸发、地表径流、土壤蒸发、植物蒸腾、融雪以及土壤剖面渗漏水等。模型数学表达式为:

$$R = P - D - ET_a - \Delta W \quad (1)$$

式中: R 为降雨入渗补给量; P 为降雨量; D 为径流量; ET_a 为实际蒸散发量; ΔW 为土壤水增量。

3.2 模型的影响因素

3.2.1 土地利用图

土地利用的变化(LUCC)直接体现和反映了人类活动的影响程度,它对水循环过程的影响结果十分显著。本次研究采用的数字化土地利用图来源于“中国西部环境与生态科学数据中心”(http://westdc.westgis.ac.cn),是目前可获得的精度最高的研究区土地利用数据产品。详细的土地利用分类代码(表2)及结果见图3。

表2 土地利用分类及代码

Tab. 2 Land use types and corresponding codes

一级类型	二级类型及代码
1 耕地	11 水田; 12 旱地
2 林地	21 有林地; 22 灌木林; 23 疏林地; 24 其他林地
3 草地	31 高覆盖度草地; 32 中覆盖度草地; 33 低覆盖度草地
4 水域	41 河渠; 42 湖泊; 43 水库坑塘; 44 永久性冰川雪地; 45 滩涂; 46 滩地
5 城乡、工矿、居民用地	51 城镇用地; 52 农村居民点; 53 其他建设居民用地
6 未利用土地	61 沙地; 62 戈壁; 63 盐碱地; 64 沼泽地; 65 裸土地; 66 裸岩石砾地; 67 其他

注:耕地的第三位代码分别表示1 山地; 2 丘陵; 3 平原; 4 大于25°的坡地; 如123 平原旱地。

3.2.2 土壤分类图

土壤、植被等与地下水关系密切,又对地下水的补给、径流与储集产生一定的影响。土壤类型受气

的土地利用状况、土壤类型及其理化性质数据等在 Arcgis 平台下进行空间离散处理并进行叠加,进而可以将研究区划分为不同的补给类型区。叠加结果见图 5。

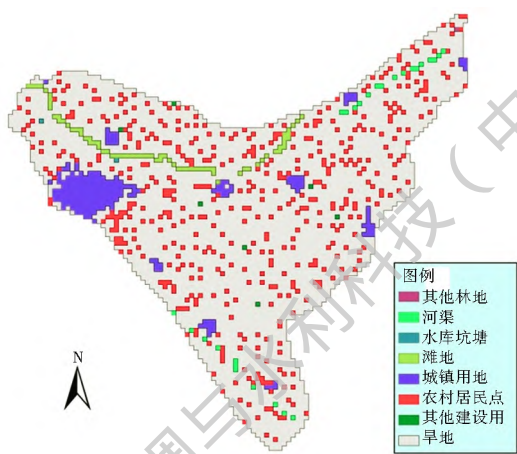


图 3 研究区土地利用图

Fig. 3 Land use map of the study area

候、地貌、植被、土壤母质、水文地质条件等诸多因素制约。本次研究依据河北省第二次土壤普查报告^[41]及河北土种志^[42]将研究区土壤划分为 3 个土类,7 个亚类(表 3),研究区土壤分类图见图 4。

表 3 研究区内土壤分类

Tab. 3 Soil classification in the study area

土壤分类	风沙土	褐土			潮土		
亚类	风沙土	碳酸盐褐土	草甸褐土	褐土性土	潮土	盐化潮土	湿潮土
代码	121	33	34	35	41	43	44

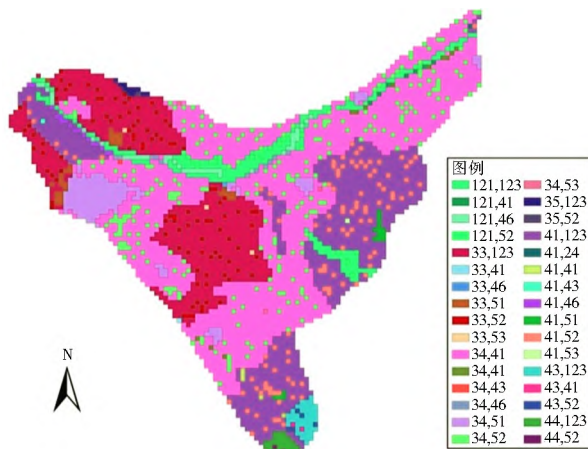


图 5 地下水补给类型分区

Fig. 5 The map of groundwater recharge types in the study area

4 未来气候条件下的地下水潜在补给变化

4.1 典型区模型构建

本次研究以中国科学院栾城农业生态试验站为典型区,该站土壤剖面的理化性质参数^[43]见表 4。

表 4 栾城典型区土壤物理性质

Tab. 4 Physical properties of soil in a typical profile in Luancheng

土壤深度 / cm	土壤质地	容重 / (g·cm ⁻³)	比重 / (g·cm ⁻³)	孔隙度 (%)	田间持水量 (%)	凋萎湿度 (%)	饱和导水率 / (m·d ⁻¹)
0~ 25	壤土	1.387	2.72	49.25	36.35	9.63	1.090
25~ 40	壤土	1.497	2.73	46.10	34.86	11.37	0.434
40~ 60	壤土	1.465	2.72	46.40	33.25	13.92	0.730
60~ 85	壤土	1.488	2.73	46.23	34.28	13.91	0.713
85~ 120	轻黏壤土	1.537	2.75	45.73	34.36	12.95	0.020
120~ 165	黏壤土	1.628	2.77	42.33	38.98	13.87	0.003
165~ 210	轻黏壤土	1.553	2.75	43.73	38.05	16.44	0.016

基于上述土壤资料,在 HELP 模型中构建了地下水补给(土壤包气带水分运移)剖面图见图 6。

4.2 模型输出结果评价

以 1961 年- 1990 年逐日气象数据为基准,将 ClimGen 模型生成的 3 种气候变化情境(P、T、P&T)气象数据分别输入到上述构建的 HELP 模型当中,输出结果见表 5。

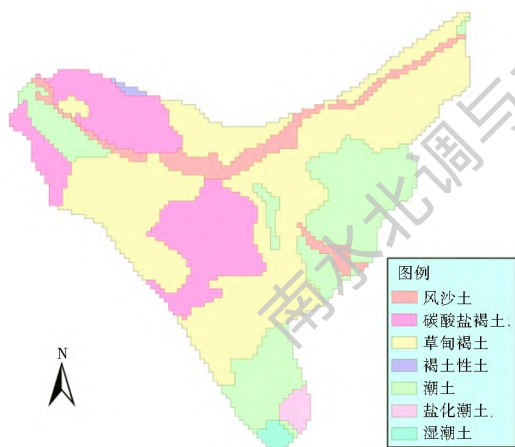


图 4 研究区土壤图

Fig. 4 Soil map of the study area

3.2.3 植被分布

植被类型分布以及植物根系深度等因素均对地下水的入渗补给产生影响,并且植被的生长发育也与地下水关系密切。本次研究中假定地下水的蒸发深度为 2 m^[43],并根据土地利用状况来定义模型的输入参数叶面积指数 LAI,给定:裸土 LAI 为 0,植被覆盖茂密地区最大叶面积指数 LAI 为 5。

3.3 地下水补给区类型划分

在研究区 DEM 数字高程的基础上,将研究区

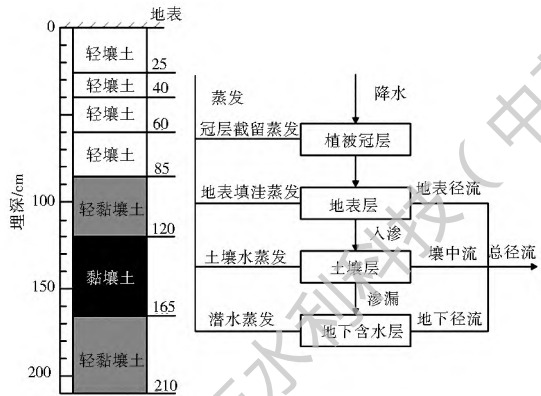


图 6 HELP 模型中土壤包气带水分运移剖面示意图

Fig. 6 A profile diagram of soil water movement in unsaturated zone in HELP

多年平均入渗补给速率为 144.07 mm/a, 这与河北省地下水资源评价报告^[44]的估算地下水补给强度 122.7 mm/a 以及吴庆华等^[45]在栾城地区利用多区模型方法评价的补给速率 124.3 mm/a 基本吻合, 这表明 ClimGen 和 HELP 模型在研究区是适用的。另外, 三种气候情景 P、T、P&T 下的地下水多年平均补给速率相比 1961 年-1990 年分别下降了 33.62 mm/a、6.37 mm/a 和 7.47 mm/a。以百分比来看, 降水减少 10% 时, 地下水补给降低了 23.33%; 温度上升 2℃ 时, 地下水补给减小了 4.42%; 当两者同时发生时, 地下水补给降低了 26.01%, 这表明降水量变化对研究区地下水多年平均入渗补给的影响较为明显, 而气温变化对入渗补给的影响相对较弱。

由表 5 可见, 典型区 1961 年-1990 年的地下水

表 5 气候变化情景下的地下水补给变化结果

Tab. 5 Groundwater recharge changes in assumed climate change scenarios

年序号	1961-1990				P 情景			T 情景			P&T 情景		
	补给速率 /(mm·a ⁻¹)	补给速率 /(mm·a ⁻¹)	变化值 /(mm·a ⁻¹)	百分比 (%)	补给速率 /(mm·a ⁻¹)	变化值 /(mm·a ⁻¹)	百分比 (%)	补给速率 (mm·a ⁻¹)	变化值 /(mm·a ⁻¹)	百分比 (%)	补给速率 (mm·a ⁻¹)	变化值 /(mm·a ⁻¹)	百分比 (%)
1	55.67	41.28	-14.39	-25.85	50.96	-4.71	-8.47	38.26	-17.41	-31.28			
2	261.23	207.52	-53.71	-20.56	245.88	-15.35	-5.88	201.13	-60.10	-23.01			
3	268.60	225.20	-43.40	-16.16	262.78	-5.82	-2.17	226.88	-41.72	-15.53			
4	122.26	100.84	-21.42	-17.52	117.00	-5.26	-4.30	99.90	-22.36	-18.29			
5	89.15	63.22	-25.93	-29.09	93.07	3.92	4.40	63.51	-25.64	-28.76			
6	159.44	122.79	-36.65	-22.99	157.92	-1.52	-0.95	120.94	-38.50	-24.15			
7	47.86	41.22	-6.64	-13.88	46.65	-1.21	-2.53	40.67	-7.19	-15.02			
8	104.84	66.47	-38.37	-36.60	98.52	-6.33	-6.03	59.84	-45.00	-42.92			
9	100.07	67.77	-32.30	-32.28	100.24	0.17	0.17	67.89	-32.18	-32.16			
10	145.33	116.31	-29.02	-19.97	144.16	-1.17	-0.81	113.42	-31.91	-21.96			
11	95.06	62.41	-32.66	-34.35	84.85	-10.21	-10.74	52.96	-42.10	-44.29			
12	86.39	59.29	-27.10	-31.37	82.44	-3.95	-4.57	50.55	-35.84	-41.48			
13	369.56	304.59	-64.97	-17.58	366.38	-3.18	-0.86	298.35	-71.21	-19.27			
14	163.85	134.13	-29.72	-18.14	159.29	-4.56	-2.78	129.91	-33.94	-20.71			
15	49.32	38.98	-10.34	-20.97	46.60	-2.72	-5.51	38.64	-10.68	-21.65			
16	74.38	34.70	-39.68	-53.35	66.43	-7.95	-10.68	34.07	-40.31	-54.19			
17	178.90	136.84	-42.06	-23.51	172.06	-6.84	-3.82	133.86	-45.04	-25.18			
18	83.96	62.61	-21.35	-25.43	76.10	-7.86	-9.37	59.23	-24.74	-29.46			
19	155.42	108.79	-46.63	-30.00	129.10	-26.32	-16.93	106.26	-49.16	-31.63			
20	41.68	40.88	-0.79	-1.91	41.79	0.11	0.26	40.00	-1.68	-4.02			
21	196.73	143.91	-52.82	-26.85	185.54	-11.19	-5.69	139.35	-57.38	-29.17			
22	184.41	155.26	-29.15	-15.81	178.89	-5.52	-2.99	151.54	-32.87	-17.82			
23	98.64	62.43	-36.21	-36.71	84.58	-14.06	-14.26	58.40	-40.24	-40.79			
24	127.52	94.99	-32.53	-25.51	123.38	-4.14	-3.25	92.54	-34.98	-27.43			
25	237.62	181.58	-56.04	-23.58	222.87	-14.75	-6.21	163.40	-74.22	-31.23			
26	115.96	84.60	-31.36	-27.04	108.59	-7.37	-6.36	74.46	-41.50	-35.79			
27	146.45	101.66	-44.79	-30.58	138.30	-8.15	-5.57	105.68	-40.77	-27.84			
28	214.78	184.54	-30.24	-14.08	210.35	-4.43	-2.06	175.59	-39.19	-18.25			
29	277.81	218.55	-59.26	-21.33	270.45	-7.36	-2.65	219.88	-57.93	-20.85			
30	69.09	50.18	-18.91	-27.37	65.68	-3.42	-4.95	40.80	-28.30	-40.95			
平均	144.07	110.45	-33.62	-23.33	137.69	-6.37	-4.42	106.60	-37.47	-26.01			

5 结论

(1) 以石家庄气象站近 50 年来的气候变化统计分析结果为基础, 结合前人的相关研究成果, 构建了 3 个未来气候变化情景, 分别为 P(降水减少 10%)、T(温度上升 2 °C)、P&T(降水减少 10%, 同时温度上升 2 °C)。

(2) 以 1961 年—1990 年的实测气象数据为参考基准, 输入到气候变化与地下水补给耦合模型中, 结果表明该区地下水多年平均补给速率为 144.1 mm/a, 这与前人在该地区的评价结果基本吻合, 验证了该模型在研究区的适用性。

(3) 地下水补给模型输出结果显示: 未来气候情景 P、T、P&T 下的地下水多年(2011 年—2040 年)平均入渗补给速率分别为 110.5 mm/a、137.7 mm/a、106.6 mm/a, 与 1961 年—1990 年相比分别下降了 23.33%、4.42%、26.01%。其中降水量变化对研究区地下水入渗补给的影响较为明显, 而气温变化对入渗补给的影响相对较弱。

参考文献(References):

- [1] 张宗祜. 华北平原地下水环境演化[M]. 北京: 地质出版社, 2000. (ZHANG Zong hu. Evolution of groundwater environment in the North China Plain[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000. (in Chinese))
- [2] 张光辉, 费宇红, 刘克岩, 等. 华北平原农田区地下水开采量对降水变化响应[J]. 水科学进展, 2006, 17(1): 43-48. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2006.01.008 (ZHANG Guang hui, FEI Yu hong, LIU Ke yan, et al. Regional groundwater pumpage for agriculture responding to precipitation in North China Plain[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(1): 43-48. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2006.01.008 (in Chinese))
- [3] 费宇红, 张兆吉, 张凤娥, 等. 气候变化和人类活动对华北平原水资源影响分析[J]. 地球学报, 2007, 28(7): 567-571. (FEI Yu hong, ZHANG Zhao ji, ZHANG Feng e, et al. An analysis of the influence of human activity and climate change on water resources of the North China Plain[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2007, 28(7): 567-571. (in Chinese))
- [4] 吴爱民, 李长青, 徐彦泽, 等. 华北平原地下水可持续利用的主要问题及对策建议[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(6): 110-113. (WU Ai min, LI Chang qing, XU Yan ze, et al. Key issues influencing sustainable groundwater utilization and its countermeasures in North China Plain[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(6): 110-113. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2010.06110
- [5] 付国斌. 全球变暖对华北水资源影响的初步分析[J]. 地理学与国土研究, 1991, 7(4): 22-26. (FU Guo bin. Preliminary analysis of impacts of global warming on water resources in North China[J]. Geography and Territorial Research, 1991, 7(4): 22-26. (in Chinese))
- [6] 马晓波. 华北地区水资源的气候特征[J]. 高原气象, 1999, 18(4): 520-524. (MA Xiao bo. Climate characteristics of water resources in North China[J]. Plateau Meteorology, 1999, 18(4): 520-524. (in Chinese))
- [7] 马洁华, 刘园, 杨晓光, 等. 全球气候变化背景下华北平原气候资源变化趋势[J]. 生态学报, 2010, 30(14): 3818-3827. (MA Jie hua, LIU Yuan, YANG Xiao guang, et al. Characteristics of climate resources under global climate change in the North China Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(14): 3818-3827. (in Chinese))
- [8] 张书萍, 祝从文, 周秀骥. 华北水资源年代际变化及其与全球变暖之间的关联[J]. 大气科学, 2014, 38(5): 1005-1016. (ZHANG Shu ping, ZHU Cong wen, ZHOU Xiur ji, et al. Decadal variability of water resources in North China and its linkage to the global warming[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2014, 38(5): 1005-1016. (in Chinese))
- [9] 宋献方, 李发东, 刘昌明, 等. 太行山区水循环及其对华北平原地下水的补给[J]. 自然资源学报, 2007, 22(3): 398-408. (SONG Xian fang, LI Fa dong, LIU Chang ming, et al. Water cycle in Taihang Mt. and its recharge to groundwater in North China Plain[J]. Journal of natural resources, 2007, 22(3): 398-408. (in Chinese)) DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13231
- [10] 汪丙国. 地下水补给评价方法研究以华北平原为例[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2008. (WANG Bing guo. Research on estimating methods of groundwater recharge: A case study in North China Plain[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2008. (in Chinese))
- [11] 王仕琴, 宋献方, 王勤学, 等. 华北平原浅层地下水水位动态变化[J]. 地理学报, 2008, 63(5): 462-472. (WANG Shi qin, SONG Xian fang, WANG Qin xue, et al. Dynamic features of shallow groundwater in North China Plain[J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(5): 462-472. (in Chinese))
- [12] 陈宗宇, 皓洪强, 卫文, 等. 华北平原深层地下水的更新与资源属性[J]. 资源科学, 2009, 31(3): 388-393. (CHEN Zong yu, GAO Hong qiang, WEI Wen, et al. Groundwater renewal and characteristics in the deep confined aquifer in North China Plain[J]. Resources Science, 2009, 31(3): 388-393. (in Chinese))
- [13] 张兆吉, 费宇红, 陈宗宇, 等. 华北平原地下水可持续利用调查评价[M]. 北京: 地质出版社, 2009. (ZHANG Zhao ji, FEI Yu hong, CHEN Zong yu, et al. Investigation and assessment of sustainable utilization of groundwater resources in the North China Plain[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009. (in Chinese))
- [14] 张光辉, 费宇红, 张行南, 等. 滹沱河流域平原区地下水流场异常变化与原因[J]. 水利学报, 2008, 39(6): 747-752. (ZHANG Guang hui, FEI Yu hong, ZHANG Xing nan, et al. Abnormal variation of groundwater flow field in plain area of Hutuo River basin and analysis on its cause[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(6): 747-752. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2008.06.003
- [15] 张永强, 刘昌明, 沈彦俊. 太行山前平原浅层地下水水位动态分析以河北省栾城县为例[J]. 中国生态农业学报, 2001, 9

- (2): 38-40. (ZHANG Yong-qiang, LIU Chang-ming, SHEN Yair-jun. Analysis of the groundwater level change in Taihang Piedmont A case study from Luancheng County[J]. Chinese Journal of Eco Agriculture, 2001, 9(2): 38-40. (in Chinese))
- [16] 庞靖鹏, 徐宗学, 刘昌明. SWAT 模型中天气发生器与数据库构建及其验证[J]. 水文, 2007, 27(5): 25-30. (PANG Jing-peng, XU Zong-xue, LIU Chang-ming. Weather generator and database in the SWAT model[J]. Journal of China hydrology, 2007, 27(5): 25-30. (in Chinese))
- [17] 张光辉. CLIGEN 天气发生器在黄河流域的适应性研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 175-178, 196. (ZHANG Guang-hui. Adaptability of climate Generator of CLIGEN in Yellow River Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(1): 175-178, 196. (in Chinese)) DOI: 10.13870/j.cnki.stbcx.2004.01.047
- [18] 廖要明, 张强, 陈德亮. 中国天气发生器的降水模拟[J]. 地理学报, 2004, 59(5): 689-698. (LIAO Yaoming, ZHANG Qiang, CHEN De-liang. Precipitation simulation in China with a weather generator[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(5): 689-698. (in Chinese))
- [19] 张凯, 唐亚平, 李岚, 等. 天气发生器与 SDSM 两种统计降尺度技术对长江中下游地区最高温度模拟的比较研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(3): 1545-1549, 1593. (ZHANG Kai, TANG Yaping, LI Lan, et al. A Comparative Study of Weather Generator and SDSM Methods Simulation on Regional Highest Temperature of Middle and Lower Reaches of Chang Jiang River[J]. Journal of Anhui agricultural sciences, 2011, 39(3): 1545-1549, 1593. (in Chinese)) DOI: 10.13989/j.cnki.0517-6611.2011.03.014
- [20] 杨文峰, 陈德亮, 胡春娟. 天气发生器对陕西降水的模拟[J]. 陕西气象, 2005, 5: 5-7. (YANG Wen-feng, CHEN De-liang, HU Chun-juan. Application of weather generator to precipitation simulation in Shanxi[J]. Journal of Shaanxi meteorology, 2005, 5: 5-7. (in Chinese))
- [21] Richardson C W, Wright D A. W GEN: A model for generating daily weather variables[R]. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service Publisher, No. ARS-8, 83. 1984.
- [22] Sharpley A N, J R Williams. EPIC-erosion/ productivity impact calculator: 1. Model Documentation[R]. US Department of Agriculture Technical Bulletin No. 1768, 1990.
- [23] Hanson C L, K A Cumming, D A Woolhiser, et al. Microcomputer program for daily weather simulation[R]. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service Publisher. No. ARS 114, 38. 1994.
- [24] Arnold C D, Ellio W J. CLIGEN-weather generator predictions of seasonal wet and dry spells in Uganda[J]. Transactions of the Asae, 1996, 39(3): 969-972.
- [25] Danuso F, et al. CLIMAK reference manual[R]. DPVTA, University of Udine, Italy, 1997.
- [26] Stöckle C O, G S Campbell, R Nelson. ClimGen manual[R]. Biological Systems Engineering Department, Washington State University, Pullman, WA, 1999.
- [27] Hulme M, Wigley T M L, Barrow E M, et al. Using a climate scenario generator for vulnerability and adaptation assessments: MAGICC and SCENGEN Version 2.4 workbook[R]. Climatic Research Unit, Norwich UK, 2000.
- [28] Semenov M A. LARS-WG: A stochastic weather generator for use in climate impact studies [EB/OL]. 2002, F27. <http://www.rothamsted.ac.uk/mas/models/larswg.Php>.
- [29] Selker J S, Haithier D A. Development and testing of single parameter precipitation distributions[J]. Water Resources Research, 1990, 26(11): 2733-2740.
- [30] Richardson C W. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation[J]. Water Resources Research, 1981, 17(1): 182-190.
- [31] Bristow K L, Campbell G S. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1984, 31: 159-166.
- [32] Jovanovic N Z., Annandale J G, Benad N, et al. CLIMGEN-UP: A user friendly weather data generator[J]. South African Journal of Plant & Soil, 2003, 20(4): 203-205.
- [33] Tingem M, Rivington M, Azamali S, et al. Assessment of the ClimGen stochastic weather generator at Cameroon sites[J]. African Journal of Environmental Science and Technology, 2007, 1(4): 86-92.
- [34] Chen J, Brissette, F. P. Comparison of five stochastic weather generators in simulating daily precipitation and temperature for the Loess Plateau of China[J]. International Journal of Climatology, 2014, 34(10): 3089-3105. DOI: 10.1002/joc.3896
- [35] 陈隆勋, 邵永宁, 张清芬, 等. 近四十年我国气候变化的初步分析[J]. 应用气象学报, 1991, 2(2): 164-174. (CHEN Long-xun, SHAO Yong-ning, ZHANG Qing-fen, et al. Preliminary analysis of climatic change during the last 39 years in China [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1991, 2(2): 164-174. (in Chinese))
- [36] 柳艳香, 吴统文, 郭裕福, 等. 华北地区未来 30 年气候变化趋势模拟研究[J]. 气象学报, 2007, 65(1): 45-51. (LIU Yan-xiang, WU Tong-wen, GUO Yu-fu, et al. Prediction research of climate change trends over north china in the future 30 years[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2007, 65(1): 45-51. (in Chinese))
- [37] 赵少华, 杨永辉, 邱国玉, 等. 河北平原 34 年来气候变化趋势分析[J]. 资源科学, 2007, 29(4): 109-113. (ZHAO Shaohua, YANG Yonghui, QIU Guoyu, et al. Analyzing the climatic changes in Hebei Plain over the last 34 years[J]. Resources Science, 2007, 29(4): 109-113. (in Chinese))
- [38] Schroeder P R., Gibson A C, Smolen M D. The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model, volume II, documentation for version 1 [R]. EPA/530/SW-84/010, US Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH. 1984.
- [39] Jyrkama M I, Sykes J F, Normani S D. Recharge estimation for transient ground water modeling[J]. Ground Water, 2002, 40(6): 638-648.

- [15] 钟明, 万云, 万安, 等. 沙颍河流域沉积物重金属污染特征及生态风险评价[J]. 生态学杂志, 2016(7): 1857-1864. (ZHONG Ming, WAN Yun, WAN An, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the sediments of Shaying River[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016(7): 1857-1864. (in Chinese)) DOI: 10.13292/j.1000-4890.201607.008
- [16] 张多纯, 张幼宽. 城镇化和闸坝对沙颍河流量的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(4): 6-10. (ZHANG Duochun, ZHANG Youkuan. Impacts of urbanization and dams on river runoff in the Shaying River Basin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(4): 6-10. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nbsdqk.2014.04.002
- [17] 李冬锋, 左其亭. 重污染河流闸坝作用分析及调控策略研究[J]. 人民黄河, 2014(8): 87-90. (LI Dongfeng, ZUO Qiting. Effect simulation and regulation strategy of dam on heavily polluted rivers[J]. Yellow River, 2014(8): 87-90. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2014.08.026
- [18] 褚金庭. 沙颍河流量和水质对淮河污染的影响[J]. 水资源保护, 2001(3): 4-7. (CHU Jinting. Influence of flow rate and water quality of Shayinghe River on water quality in Huaihe River[J]. Water Resources Protection, 2001(3): 4-7. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2001.03.002
- [19] 左其亭, 罗增良, 石永强, 等. 沙颍河流域主要参数与地理特征[J]. 水利水电技术, 2016(12): 110-116. (ZUO Qiting, LUO Zengliang, SHI Yongqiang, et al. Main parameters and physiographic characteristics of Shaying River Basin[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016(12): 110-116. (in Chinese)) DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2016.12.000
- [20] 沈永平, 王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013(5): 1068-1076. (SHEN Yongping, WANG Guoya. Key findings and assessment results of IPCC WG1 fifth assessment report[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013(5): 1068-1076. (in Chinese)) DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0120
- [21] 叶磊, 周建中, 曾小凡, 等. 水文多变量趋势分析的应用研究[J]. 水文, 2014(6): 33-39. (YE Lei, ZHOU Jianzhong, ZENG Xiaofan, et al. Application of hydrological multivariate trend analysis[J]. Journal of China Hydrology, 2014(6): 33-39. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2014.06.006
- [22] 章诞武, 丛振涛, 倪广恒. 基于中国气象资料的趋势检验方法对比分析[J]. 水科学进展, 2013(4): 490-496. (ZHANG Dawu, CONG Zhen tao, NI Guangheng. Comparison of three Mann-Kendall methods based on the China's meteorological data[J]. Advances in Water Science, 2013(4): 490-496. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2013.04.019
- [23] 桑燕芳, 王中根, 刘昌明. 小波分析方法在水文学研究中的应用现状及展望[J]. 地理科学进展, 2013(9): 1413-1422. (SANG Yanfang, WANG Zhonggen, LIU Changming. Applications of Wavelet Analysis to Hydrology: Status and Prospects[J]. Progress in Geography, 2013(9): 1413-1422. (in Chinese)) DOI: 10.11820/dlkxjz.2013.09.011
- [24] 王文圣, 丁晶, 向红莲. 小波分析在水文学中的应用研究及展望[J]. 水科学进展, 2002(4): 515-520. (WANG Wen sheng, DING Jing, XIANG Honglian. Application and prospect of wavelet analysis in hydrology[J]. Advances in Water Science, 2002(4): 515-520. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2002.04.021
- [25] Zhang L, Dawes W R, Walker G R. The Response of Mean Annual Evapotranspiration to Vegetation Changes at Catchment Scale[J]. Water Resources Management, 2001, 37: 701-708. DOI: 10.1029/2000WR900325
- [26] 孙福宝, 杨大文, 刘志雨, 等. 基于 Budyko 假设的黄河流域水热耦合平衡规律研究[J]. 水利学报, 2007(4): 409-416. (SUN Furbao, YANG Dawen, LIU Zhiyu, et al. Study on coupled water energy balance in Yellow River Basin based on Budyko hypothesis[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007(4): 409-416. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2007.04.005
- [27] Koster R D, Suarez M J. A Simple Framework for Examining the Interannual Variability of Land Surface Moisture Fluxes[J]. Journal of Climate, 1999, 12: 1911-1917. DOI: 10.1175/1520-0442(1999)012<1911:ASFFET>2.0.CO;2

(上接第 35 页)

- [40] Jyrkama M I, Sykes J F. The impact of climate change on spatially varying groundwater recharge in the grand river watershed (Ontario) [J]. Journal of Hydrology, 2007, 338: 237-250. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2007.02.036.
- [41] 河北省土壤普查办公室. 河北省第二次土壤普查数据集[R]. 1991. (Department of Soil Survey in Hebei. Data set of the Second Soil survey in Hebei[R]. 1991. (in Chinese))
- [42] 丁鼎治, 李顺, 王壮图, 等. 河北土种志[M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 1992. (DING Dingzhi, LI Shun, WANG Zhuangtu, et al. Soil type in Hebei[M]. Shijiazhuang: Hebei Science and Technology Press, 1992. (in Chinese))
- [43] 靳孟贵, 汪丙国, 郭会荣, 等. 华北平原水文地质参数调查研究报告[R]. 2005. (JING Menggui, WANG Bingguo, GUO Huirong, et al. Investigation of hydrogeological parameters in North China Plain[R]. 2005. (in Chinese))
- [44] 河北省水文总站. 河北省地下水资源评价报告[R]. 1990. (Hebei hydrological station. Evaluation of groundwater resource in Hebei[R]. 1990. ((in Chinese))
- [45] 吴庆华, 张薇, 蔺文静, 等. 人工示踪方法评价地下水入渗补给及其优先流程度以河北栾城和衡水为例[J]. 地球学报, 2014, 35(4): 495-502. (WU Qinghua, ZHANG Wei, LIN Wenjing, et al. The estimation of groundwater recharge and preferential flow based on the applied tracers: A case study of Luancheng and Hengshui areas in Hebei province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2014, 35(4): 495-502. (in Chinese)) DOI: 10.3975/cagsb.2014.04.12.