

## 冀中山前平原农业区浅层地下水位 对连年少雨响应特征与机制

张光辉,王 茜,田言亮,严明疆,王 威

(中国地质科学院水文地质环境地质研究所,河北 石家庄 050061)

**摘 要:**冀中山前平原农业区浅层地下水是当地农田灌溉的主要水源,已处于超采状态。依据冀中山前平原不同农业区长观孔浅层地下水位动态监测资料,对浅层地下水位响应连年降水偏枯的变化规律进行了研究。结果表明:降水连年偏枯(少雨)时段的春灌期大规模集中开采浅层地下水,是冀中山前平原农业区浅层地下水位不断下降的主要动因;春灌期农业区浅层地下水位降幅与前一年和当年 1 月到 6 月降水量密切相关;当年降水量小于当地多年平均降水量(528.4 mm)时,随着降水量减小,农业用水开采对浅层地下水位下降的影响增大;当年降水量大于当地多年平均降水量尤其大于 620 mm 时,农业用水开采对浅层地下水位下降的影响显著减弱;合理调控农业区浅层地下水开采强度是缓解冀中山前平原农业区浅层地下水超采情势的重要举措。

**关键词:**浅层地下水;灌溉;超采;地下水位;干旱;春灌期;山前平原;农业区

**中图分类号:**P641.8;S273.4

**文献标志码:**A

## Response Characteristic and Mechanism of Shallow Groundwater Level on the Successive Years with Less Rainfall in the Agricultural Areas of the Central Hebei Piedmont Plain

ZHANG Guang-hui, WANG Qian, TIAN Yan-liang, YAN Ming-jiang, WANG Wei

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

**Abstract:** Shallow groundwater, which is in over-exploitation, is the main water source of farm irrigation in the agricultural areas of the central Hebei piedmont plain. According to the dynamic monitoring data of shallow groundwater level from long-time observation hole in the different agricultural areas of the central Hebei piedmont plain, variable characteristics of shallow groundwater level response to the successive years with less rainfall were studied. The results show that large-scale and intensive shallow groundwater exploitation during spring irrigation periods of successive years with less rainfall mainly causes the continuous decline of shallow groundwater level in the agricultural areas of the central Hebei piedmont plain; the decline amplitude of shallow groundwater level during spring irrigation period is related closely with the precipitation from January to June of the previous year and the same year; when the annual precipitation is less than the local annual average precipitation (528.4 mm), the effect of agricultural water exploitation on the decline of shallow groundwater increases significantly with the decrease of precipitation; when the annual precipitation is more than the local annual average

收稿日期:2015-01-07

基金项目:国家自然科学基金项目(41172214);中国地质调查局地质大调查项目(1212011220941)

作者简介:张光辉(1959-),男,辽宁沈阳人,研究员,博士研究生导师,理学博士,E-mail:huanjing59@163.com。

precipitation, even more than 630 mm, the effect of agricultural water exploitation on the decline of shallow groundwater decreases significantly; adjusting and controlling rationally the exploitation intensity of shallow groundwater in the agricultural areas is important for improving the sustainable utilization of shallow groundwater in the agricultural areas of the central Hebei piedmont plain.

**Key words:** shallow groundwater; irrigation; over-exploitation; groundwater level; arid; spring irrigation period; piedmont plain; agricultural area

## 0 引言

气候干旱即降水连年偏枯(少雨),是加剧农业区浅层地下水开采强度(单位时间单位面积的开采量)的驱动力<sup>[1-2]</sup>。冀中山前平原是中国冬小麦、夏玉米作物的主要种植区和华北平原浅层地下水超采的主要分布区<sup>[3-4]</sup>。20世纪70年代以来,该平原降水偏枯的年份居多,尤其是连年少雨时有发生。自1991年以来至少发生过3期连续3年及以上的降水偏枯时段,加剧了该平原农业区浅层地下水超采程度,导致该区浅层地下水位不断下降。因此,进一步认识冀中山前平原农业区浅层地下水位对连年少雨的响应特征与可调控性,对于提高农业区浅层地下水可持续利用能力和缓解超采具有重要意义。

有关浅层地下水与农业用水及降水之间关系的研究较多<sup>[5-7]</sup>。严明疆等研究了作物生长季节降水量及农业用水开采量对浅层地下水变化的影响<sup>[8]</sup>;袁野等认为降水量对农业用水开采量影响显著,进而导致浅层地下水位明显下降,农业用水开采量变化对浅层地下水位影响的程度远大于降水量变化的影响程度<sup>[9]</sup>;汪丽芳等研究发现每年3月以后随着灌溉用水量的增加,浅层地下水位明显下降<sup>[10]</sup>;刘中培等研究认为,华北平原农业区浅层地下水位下降不仅与灌溉农业密切相关,而且与降水量年际变化有一定关系<sup>[11]</sup>;李新波等认为,集约化农业活动对浅层地下水位下降的影响呈增大态势<sup>[12]</sup>;王电龙等认为,气候变化是石家庄平原区浅层地下水位不断下降的重要影响因素<sup>[13]</sup>;袁再健等研究认为,河北平原农田耗水对浅层地下水动态变化有明显影响<sup>[14]</sup>;张光辉等认为,浅层地下水位下降不仅与灌溉农业密切相关,还与降水量变化有关<sup>[15-18]</sup>;刘燕等分别研究了农业和生态区水资源承载力相关问题<sup>[19-22]</sup>;彭致功等研究了农业节水措施对浅层地下水的涵养作用<sup>[23]</sup>;周维博等对井渠灌区浅层地下水动态预报及灌溉入渗对浅层地下水的影响进行了研究<sup>[24-25]</sup>;徐旭等模拟了区域尺度农田水盐动态<sup>[26]</sup>。

但是,有关连年少雨对农业区浅层地下水超采的影响特征研究有所欠缺,需加强研究。本文依据冀中山前平原不同农业区的长观孔浅层地下水位动态监测资料,侧重研究了农业区浅层地下水位对连年降水偏枯的响应变化特征与机制。

## 1 研究区概况

研究区位于河北中部的太行山东麓山前平原,地处河北省保定—石家庄—邢台—衡水一带,面积 $1.23 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。区内第四系主要为冲洪积地层,第I、II含水层组(浅层地下水)以中粗砂、砂卵砾石层为主,含水层厚度30~70 m,底板埋深小于120 m,渗透系数为 $80 \sim 300 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 。包气带厚度介于15~45 m之间,由粉细砂组成。区域浅层地下水流向为NW—SW向。区内粮食作物播种面积占农作物总播种面积的81.27%,其中以小麦为主的夏粮作物面积占68.23%。每年冬小麦灌溉用水量占全年农业灌溉用水量的51.48%,夏玉米灌溉用水量占25.05%<sup>[1]</sup>。

研究区1956~2012年多年平均降水量为528.4 mm,降水主要集中在每年的6月到9月,冬小麦生育期内降水量不足全年的20%。自20世纪80年代以来,区内绝大部分河流长期干涸,地表水资源十分匮乏,浅层地下水是当地供水的主要来源。近5年来,该区浅层地下水开采量占当地总供水量的81.35%;在浅层地下水开采量中,农业用水占当地总开采量的83.65%<sup>[1]</sup>。

研究区农业生产大规模开采浅层地下水始于1972年,当年该平原区降水量为280.3 mm。1972年之前,该区平均开采机井密度不足每平方千米3眼,82.6%的区域浅层地下水位埋深小于10 m;现今平均机井密度为每平方千米13眼,最高达每平方千米22眼,浅层地下水位呈现区域性不断下降趋势(图1)。

## 2 材料与方法

选择以小麦、玉米等粮食作物为主的区域作为重点研究区,考虑不同浅层地下水位埋深的影响,收

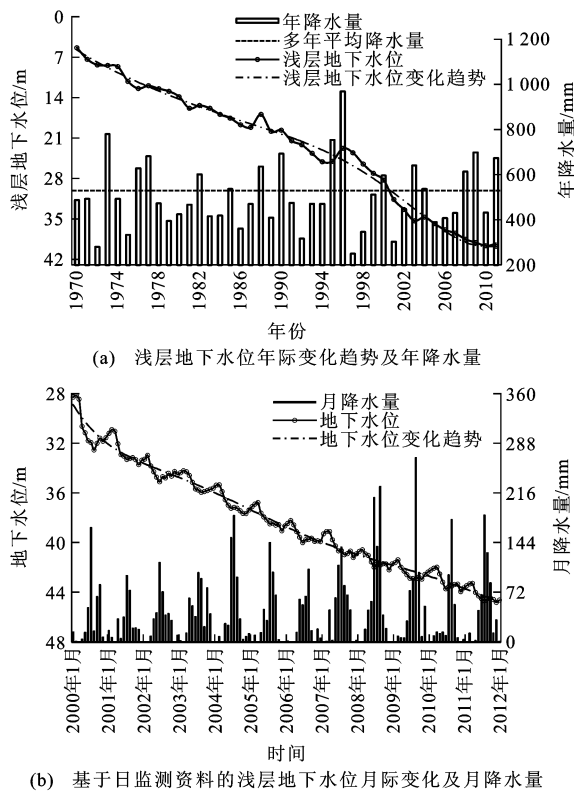


图 1 冀中山前平原农业区浅层地下水位及降水量变化特征

Fig. 1 Variable Characteristics of Shallow Groundwater Level and Precipitation in the Agricultural Areas of the Central Hebei Piedmont Plain

集了 1970 年以来区内国家级、省级农田区长观孔的浅层地下水位动态监测资料以及 1991 年以来日监测资料和同期降水等气象资料。在典型农业区建立 9 眼监测孔,进行小时级的浅层地下水位动态智能长观孔监测,每 3 h 监测一次,包括浅层地下水位、水温和电导率等;在农业集中灌溉期间还监测灌溉用水的起止时间和浅层地下水开采量。

以农业区浅层地下水位长观孔监测资料为基础,应用时间序列异变特征和趋势分析方法,研究地

表 1 基于长观孔监测资料的 2008~2012 年春灌期浅层地下水位变化特征

Tab. 1 Variable Characteristics of Shallow Groundwater Level During Spring Irrigation Periods of 2008-2012 Based on Monitoring Data from Long-time Observation Hole

浅层地下水位 特征值		柏乡农业区					赵县农业区					定兴农业区				
		2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年
水位/m	初值	68.89	63.94	65.78	71.90	72.85	43.80	44.10	45.20	48.00	49.60	12.40	12.70	12.10	15.40	16.85
	终值	69.62	66.88	71.50	73.81	73.91	44.40	46.50	49.00	49.90	51.60	14.16	13.85	15.50	16.40	17.15
时段水位差/m		-0.73	-2.94	-5.72	-1.91	-1.06	-0.56	-2.43	-3.79	-1.95	-1.99	-1.76	-1.15	-3.40	-1.00	-0.30
时段日均水位 降幅/(cm·d <sup>-1</sup> )		0.69	2.77	5.40	1.80	1.00	0.53	2.29	3.58	1.84	1.88	1.66	1.08	3.21	0.94	0.28
1月至6月 降水量/mm		228.8	111.8	49.3	93.3	183.5	210.1	118.9	79.9	121.2	154.3	336.5	126.3	60.4	131.9	254.7

下水位变化趋势。利用 1991 年以来每 5 日监测一次的动态资料,识别和分析降水连年偏枯时段、春灌期间及之后的浅层地下水位变化特征,重点分析灌溉期浅层地下水位降幅特征。基于小时级浅层地下水位监测资料,以日为基础时间单元,研究春灌期浅层地下水位降幅对降水量变化的响应特征,并用于验证。

### 3 近 40 年来浅层地下水位变化特征

从图 1(a)可以看出,自 20 世纪 70 年代以来,冀中山前平原农业区浅层地下水位呈现不断下降趋势,年均降幅 0.83 m。只有 1988~1990 年(年降水量为 635.7~693.8 mm)和 1995~1996 年(年降水量为 707.6~969.1 mm)出现流域性暴雨泛洪,上游水库大量泄洪,区内浅层地下水位出现普遍的大幅度上升,浅层地下水超采情势从而得以缓解。图 1(b)表明,研究区浅层地下水位大幅下降主要发生在每年的春季小麦等作物大规模集中灌溉时期,其间浅层地下水位降幅明显大于灌溉之后每年 8 月至次年 2 月的浅层地下水位升幅,进而导致研究区浅层地下水位呈现不断下降趋势。

### 4 春灌期浅层地下水位降幅特征及与降水量之间的关系

#### 4.1 浅层地下水位变化特征

2008~2012 年的每年 3 月 15 日至 6 月 30 日春灌期间,随着 1 月至 6 月降水量的变化,河北柏乡、赵县和定兴农业区浅层地下水位响应变化的日均降幅大于 1.0 cm,都呈现春灌加剧农业区浅层地下水超采的特征。只有在降水明显偏丰条件下,日均水位降幅才会小于 1.0 cm。分布在不同农业区的 9 眼监测孔小时级浅层地下水位动态监测结果与上述规律吻合;在 2013 年春灌期间,浅层地下水位都呈现每天厘米级的下降特征(表 1、2)。

表 2 基于小时级长观孔监测资料的 2013 年春灌期浅层地下水位变化特征

Tab. 2 Variable Characteristics of Shallow Groundwater Level During Spring Irrigation Period of 2013 Based on Monitoring Data at One-hour Interval from Long-time Observation Hole

浅层地下水位特征值		新乐农业区	无极农业区	藁城农业区	正定农业区
水位/m	初值	24.22	24.65	31.68	47.23
	终值	25.70	26.73	33.74	49.06
时段水位差/m		-1.48	-2.08	-2.06	-1.83
时段日均水位降幅/(cm·d <sup>-1</sup> )		1.86	2.46	2.52	1.64

注:初值取自每年 3 月 15 日监测数据,终值为每年 6 月 30 日监测数据;2013 年 1 月至 6 月研究区降水量为 112.6 mm;研究区浅层地下水位初值平均为 31.95 m,终值平均为 33.81 m,时段水位差平均值为-1.86 m,时段日均水位降幅平均值为 2.12 m。

4.2 降水连年偏枯时段浅层地下水位变化特征

图 2 是采用每年春灌之后的最低浅层地下水位和当年降水量资料编绘的,反映春灌及前一年降水量对农业区浅层地下水位的影响特征。1991 年以来曾出现过 3 期至少连续 3 年的降水偏枯期。降水偏枯期指年降水量小于 1956~2012 年多年平均降水量的时期。3 个降水偏枯期分别为 1991~1994 年、1997~1999 年和 2002~2007 年。这 3 个时期的农业区浅层地下水位年降幅分别为 1.66、3.14、1.23 m,明显大于同一监测孔在降水偏丰或平水期间(如 2008~2011 年)的浅层地下水位降幅(0.56 m)。

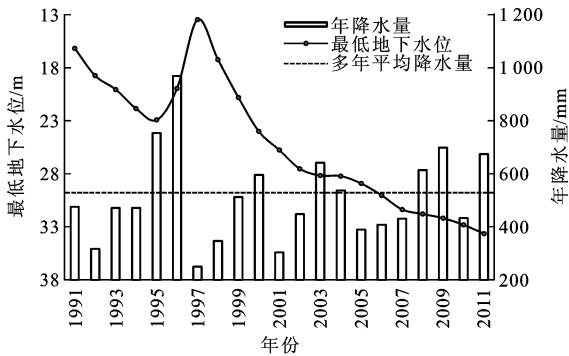


图 2 连年降水偏枯时段春灌期最低浅层地下水位变化特征

Fig. 2 Variable Characteristics of the Lowest Shallow Groundwater Level During Spring Irrigation Periods of the Continuous Years with Less Rainfall

1970~2011 年,研究区多年平均浅层地下水位降幅为每年 0.83 m(图 2)。1991~1994 年、1995~1997 年和 2002~2007 年春灌期浅层地下水位平均

降幅(春灌期初始浅层地下水位与灌溉后最低浅层地下水位之差的多年平均值)分别为 2.62、3.55、1.28 m,是 1970~2011 年多年平均降幅的 1.48~3.78 倍,而降水偏丰的 2008~2011 年春灌期浅层地下水位降幅(0.98 m)与 1970~2011 年多年平均降幅趋近。这再次表明,降水偏枯条件下春灌期农业大规模集中开采浅层地下水,是冀中山前平原农业区浅层地下水位加剧下降和超采的主要动因。

4.3 浅层地下水位降幅与降水量之间的关系

降水连年偏枯,尤其是秋、冬、春季持续干旱,加之研究区地表水资源十分匮乏,浅层地下水是该区灌溉用水的主要水源,因此,浅层地下水开采强度必然随气候干旱的加剧而增大,浅层地下水位随之大幅下降。从图 2 中 3 个时段(1991~1994 年、1997~1999 年和 2002~2007 年)的每年春灌期之后最低浅层地下水位埋深变化趋势来看,水位下降幅度与前一年和当年降水量有一定相关性。相对多年平均降水量,1991~1994 年年均降水量减少 94.5 mm,对应时段的年均浅层地下水位降幅 2.62 m;1997~1999 年年均降水量减少 158.7 mm,对应时段的年均浅层地下水位降幅 3.55 m;2002~2007 年年均降水量减少 87.1 mm,对应时段的年均浅层地下水位降幅 1.28 m。而 2008~2011 年年均降水量增加 76.8 mm,对应时段的年均浅层地下水位降幅减小为 0.98 m。由此可见,降水量减少愈多,每年春灌期农业区浅层地下水位下降幅度愈大。

从图 1 可知,研究区浅层地下水已处于严重超采状态,除非发生类似 1996 年 8 月的流域性特大暴雨洪水,浅层地下水位才会较大幅度上升。一般年份浅层地下水位都呈不断下降状态,1970~2011 年浅层地下水位多年平均降幅为每年 0.83 m[图 1(a)]。春灌期降水较少,农业灌溉的开采量较大,每年浅层地下水位下降过程主要发生在该时期;春灌之后进入雨季,降水量和浅层地下水补给量都显著增大,农业用水开采量急剧减少,浅层地下水位上升,但是一般年份的浅层地下水位上升幅度都小于当年春灌期浅层地下水位下降幅度[图 1(b)],从而呈现出浅层地下水位年际不断下降的现象。在遭遇连年降水偏枯时段,例如 1997 年和 1998 年降水量分别比该区多年平均降水量少 278.6 mm 和 181.1 mm,以至于次年春灌期浅层地下水位降幅明显增大(图 2、3)。

从图 3 可知:当年降水量小于 1956~2012 年多年平均降水量(528.4 mm)时,随着降水量减小,农业区春灌期浅层地下水位降幅增大;当年降水量大



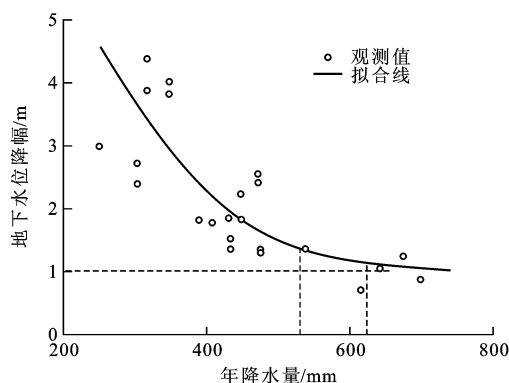


图3 春灌期浅层地下水位降幅与  
年降水量之间的关系

Fig. 3 Relationship Between Decline Amplitude of  
Shallow Groundwater Level and Annual Precipitation  
During Spring Irrigation Periods

于多年平均降水量尤其是大于 620 mm 时,降水量变化对农业区春灌期浅层地下水位降幅的影响明显减小,尤其是每年 1 月至 6 月降水量的增加对区内农业用水开采量的影响减少得更为明显。每年 1 月至 6 月降水量显著减少,也会加剧春灌期浅层地下水位下降的幅度(表 1、2)。

## 5 浅层地下水位下降动因与可调控性

### 5.1 下降动因

冀中山前平原农业区浅层地下水已处于超采状态,20 世纪 70 年代以来浅层地下水位呈现不断下降趋势,只是在每年春灌期之后,随着降水量增多,浅层地下水位才会缓慢回升,至次年 2 月和 3 月升至最高水位,但低于春灌期之前的初始水位(图 1)。在以浅层地下水作为灌溉主要水源的 40 年中,只有 1988 年 8 月和 1996 年 8 月发生流域性暴雨洪水,至来年雨季,区内浅层地下水位曾出现过显著上升过程[图 1(a)]。由此可见,春灌期开采浅层地下水是加剧冀中山前平原农业区浅层地下水位不断下降的主要动因。在图 1 中,每年浅层地下水位下降幅度等于春灌期浅层地下水位降幅与春灌期之后雨季水位升幅的代数和,多年平均为 0.83 m。如果 1 月至 6 月降水较多,或者 7 月至 9 月降水量显著大于多年平均降水量,则由于春灌期农业用水开采量明显减少,或雨季及之后浅层地下水系统获得的补给量明显增大,该年份浅层地下水位下降幅度小于 0.83 m,甚至明显上升;如果 1 月至 6 月降水明显偏少,或者 7 月至 9 月降水量显著小于多年平均降水量,则由于春灌期农业用水开采量明显增大,或雨季及之后浅层地下水系统获得的补给量明显减少,该

年份浅层地下水位下降幅度大于 0.83 m。

从某一年的全年浅层地下水水量均衡角度来看,春灌期研究区降水量不足全年的 20%,加之区内主要河道长期干涸,冬小麦等作物灌溉用水只能大规模集中开采浅层地下水,造成春灌期单位面积浅层地下水排泄量( $W_1$ )为年内日均最大值,远大于多年平均日开采强度。同时,因干旱少雨,单位面积浅层地下水获得的补给量( $W_2$ )为年内最小值,甚至无补给,远小于多年平均日补给量。源  $W_2$ 、汇  $W_1$  从两方面叠加影响,造成冀中山前平原农业区浅层地下水位系统为水量负均衡,结果必然是春灌期浅层地下水位降幅远大于当年平均或多年平均水位降幅。另外,每年 1 月至 6 月研究区降水越少,气候越干旱,农田土壤墒情水分亏缺愈严重,导致春灌期单位面积浅层地下水排泄量增大的幅度越大,春灌期浅层地下水位降幅越大;每年 1 月至 6 月研究区降水越多,农田土壤墒情水分亏缺愈轻,促使春灌期单位面积浅层地下水排泄量减小的幅度越大,春灌期浅层地下水位降幅越小。

### 5.2 可调控性

气候干旱、农业用水开采量过大是冀中山前平原农业区浅层地下水位不断下降的主要因素。气候干旱是人类无法调控的,农业用水开采量则具有可调控性。对于因农业用水开采量过大造成浅层地下水长期处于严重超采状态的地区,调减高耗水作物种植面积,优化耗水作物空间布局,降低农业灌溉用水的浅层地下水开采强度,将是缓解农业超采浅层地下水情势的重要举措。

对于农业灌溉用水比较粗放,节水潜力较大的农业区,应合理应用农艺、生物和管理节水技术,在每年春灌期结合农业气象预报,科学适度延迟春灌,推广高效节水灌溉,尽可能充分利用每年 4 月和 5 月的降水,降低浅层地下水开采强度,同时加强秋、冬季土壤墒情涵养和雨季雨洪地下水调蓄利用。

## 6 结 语

(1)冀中山前平原农业区连年少雨干旱时有发生,春灌期开采浅层地下水已成为加剧浅层地下水位不断下降的主要动因,尤其在降水连年偏枯时段的春灌期,农业用水大规模集中开采加剧了浅层地下水超采情势。

(2)当年降水量小于当地多年平均降水量(528.4 mm)时,随着降水量减少,春灌期农业用水开采对冀中山前平原浅层地下水位下降的影响增大;

当年降水量大于多年平均降水量尤其大于 620 mm 时,春灌期农业用水开采对浅层地下水位下降的影响显著减弱。

(3)通过合理调控农业灌溉用水,降低浅层地下水开采强度,有利于缓解冀中山前平原农业区浅层地下水超采情势,提升浅层地下水资源的可持续利用。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 张光辉,费宇红,王金哲,等.华北灌溉农业与地下水适应性研究[M].北京:科学出版社,2012.  
ZHANG Guang-hui,FEI Yu-hong,WANG Jin-zhe,et al. Relationship Between the Irrigation Agriculture and Groundwater in North China Plain[M]. Beijing: Science Press,2012.
- [2] 刘昌明.中国农业水问题:若干研究重点与讨论[J].中国生态农业学报,2014,22(8):875-879.  
LIU Chang-ming. Agricultural Water Issues in China: Discussions on Research Highlights[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture,2014,22(8):875-879.
- [3] 刘少玉,刘鹏飞,周晓妮,等.华北平原水资源合理开发利用的思路与举措[J].地球科学与环境学报,2012,34(3):57-61.  
LIU Shao-yu,LIU Peng-fei,ZHOU Xiao-ni,et al. Idea and Action for the Rational Development and Utilization of Water Resource in North China Plain[J]. Journal of Earth Sciences and Environment,2012,34(3):57-61.
- [4] 袁瑞强,龙西亭,王 鹏,等.白洋淀流域地下水更新速率[J].地理科学进展,2015,34(3):381-388.  
YUAN Rui-qiang,LONG Xi-ting,WANG Peng,et al. Renewal Rate of Groundwater in the Baiyangdian Lake Basin[J]. Progress in Geography,2015,34(3):381-388.
- [5] 王利书,悦琳琳,唐泽军,等.气候变化和农业发展对石羊河流域地下水位的影响[J].农业机械学报,2014,45(1):121-128.  
WANG Li-shu,YUE Lin-lin,TANG Ze-jun,et al. Influence of Climate Change and Agricultural Development on Groundwater Level in Shiyang River Basin [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(1):121-128.
- [6] 阮本清,韩宇平,蒋任飞,等.生态脆弱地区适宜节水强度研究[J].水利学报,2008,39(7):809-814.  
RUAN Ben-qing,HAN Yu-ping,JIANG Ren-fei,et al. Appropriate Water Saving Extent for Ecological Vulnerable Area[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2008,39(7):809-814.
- [7] 谭秀翠,杨金忠,宋雪航,等.华北平原地下水补给量计算分析[J].水科学进展,2013,24(1):73-81.  
TAN Xiu-cui,YANG Jin-zhong,SONG Xue-hang,et al. Estimation of Groundwater Recharge in North China Plain[J]. Advances in Water Science,2013,24(1):73-81.
- [8] 严明疆,王金哲,张光辉,等.作物生长季节降水量和农业地下水开采量对地下水变化影响研究[J].水文,2012,32(2):28-33.  
YAN Ming-jiang,WANG Jin-zhe,ZHANG Guang-hui,et al. Influence of Precipitation During Crops Growing and Groundwater Yield for Agriculture on Groundwater Dynamic[J]. Journal of China Hydrology,2012,32(2):28-33.
- [9] 袁 野,张翼龙,王贵玲,等.呼和浩特市平原区地下水水位动态与降水量及开采量的互馈效应[J].中国农村水利水电,2013(7):40-43.  
YUAN Ye,ZHANG Yi-long,WANG Gui-ling,et al. Interaction Between Groundwater Level Dynamics with Precipitation and Exploitation Quantity in Hohhot Plain[J]. China Rural Water and Hydropower,2013(7):40-43.
- [10] 汪丽芳,高业新,王建中,等.太行山前平原浅层地下水动态演变特征分析[J].安徽农业科学,2013,41(6):2643-2644,2674.  
WANG Li-fang,GAO Ye-xin,WANG Jian-zhong,et al. Dynamic Characteristic of Shallow Groundwater Evolution in Taihang Piedmont Plain[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2013,41(6):2643-2644,2674.
- [11] 刘中培,于福荣,焦建伟.农业种植规模与降水量变化对农用地下水开采量影响识别[J].地球科学进展,2012,27(2):240-245.  
LIU Zhong-pei,YU Fu-rong,JIAO Jian-wei. Impact Identification of Planting Scale and Precipitation Variation on Agricultural Groundwater Exploitation[J]. Advances in Water Science,2012,27(2):240-245.
- [12] 李新波,郝晋珉,胡克林,等.集约化农业生产区浅层地下水埋深的时空变异规律[J].农业工程学报,2008,24(4):95-98.  
LI Xin-bo,HAO Jin-min,HU Ke-lin,et al. Spatiotemporal Variation of Shallow Groundwater Depth in Intensive Agricultural Areas [J]. Transactions of the CSAE,2008,24(4):95-98.
- [13] 王电龙,张光辉,冯慧敏,等.降水和开采变化对石家庄地下水场影响强度[J].水科学进展,2014,25(3):420-427.  
WANG Dian-long,ZHANG Guang-hui,FENG Hui-min,et al. Contribution Degrees of Precipitation and

- Groundwater Exploitation to the Groundwater Flow Field in Shijiazhuang[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(3): 420-427.
- [14] 袁再健, 许元则, 谢栌乐. 河北平原农田耗水与地下水动态及粮食生产相互关系分析[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(8): 904-910.  
YUAN Zai-jian, XU Yuan-ze, XIE Lu-le, et al. Correlation Among Farmland Water Consumption, Grain Yield and Groundwater Dynamics in the Hebei Plain [J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2014, 22(8): 904-910.
- [15] 张光辉, 费宇红, 刘春华, 等. 华北滹沱平原地下水位下降与灌溉农业关系[J]. *水科学进展*, 2013, 24(2): 228-234.  
ZHANG Guang-hui, FEI Yu-hong, LIU Chun-hua, et al. Relationship Between Decline of Shallow Groundwater Levels and Irrigated Agriculture on Hufu Plain of North China[J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(2): 228-234.
- [16] 张光辉, 田言亮, 王电龙, 等. 冀中山前农业区地下水位强降弱升特征与机制[J]. *水科学进展*, 2015, 26(2): 227-232.  
ZHANG Guang-hui, TIAN Yan-liang, WANG Dian-long, et al. Sharp Decline and Sluggish Rise of Shallow Groundwater Level in the Mid-Hebei Piedmont Agricultural Region[J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(2): 227-232.
- [17] 张光辉, 连英立, 刘春华, 等. 华北平原水资源紧缺形势与因源[J]. *地球科学与环境学报*, 2011, 33(2): 172-176.  
ZHANG Guang-hui, LIAN Ying-li, LIU Chun-hua, et al. Situation and Origin of Water Resources in Short Supply in North China Plain[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2011, 33(2): 172-176.
- [18] 张光辉, 费宇红, 刘春华, 等. 华北平原灌溉用水强度与地下水承载力适应性状况[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(1): 1-10.  
ZHANG Guang-hui, FEI Yu-hong, LIU Chun-hua, et al. Adaptation Between Irrigation Intensity and Groundwater Carrying Capacity in North China Plain [J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(1): 1-10.
- [19] 刘燕, 朱红艳. 泾惠渠灌区水环境劣变特征及地下水调蓄能力分析[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(6): 19-24.  
LIU Yan, ZHU Hong-yan. Characteristics of Inferior Variation of Water Environment and Regulating Capacity of Groundwater Reservoir in Jinghui Canal Irrigation District of China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(6): 19-24.
- [20] 姜秋香, 付强, 王子龙. 三江平原水资源承载力评价及区域差异[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(9): 184-190.  
JIANG Qiu-xiang, FU Qiang, WANG Zi-long. Evaluation and Regional Differences of Water Resources Carrying Capacity in Sanjiang Plain [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(9): 184-190.
- [21] 焦醒, 刘广全, 土小宁. 黄土高原植被恢复水资源承载力核算[J]. *水利学报*, 2014, 45(11): 1344-1351.  
JIAO Xing, LIU Guang-quan, TU Xiao-ning. Estimation of Water Resources Carrying Capacity for Revegetation in the Loess Plateau [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(11): 1344-1351.
- [22] 岳卫峰, 杨金忠, 占车生. 引黄灌区水资源联合利用耦合模型[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(4): 35-40.  
YUE Wei-feng, YANG Jin-zhong, ZHAN Che-sheng. Coupled Model for Conjunctive Use of Water Resources in the Yellow River Irrigation District [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(4): 35-40.
- [23] 彭致功, 刘钰, 许迪, 等. 农业节水措施对地下水涵养的作用及其敏感性分析[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(7): 36-41.  
PENG Zhi-gong, LIU Yu, XU Di, et al. Effect of Agricultural Water-saving Measures on the Quantity of Groundwater Extraction and Recharge and Its Sensitivity [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(7): 36-41.
- [24] 周维博, 曾发琛. 井渠结合灌区地下水动态预报及适宜渠井用水比分析[J]. *灌溉排水学报*, 2006, 25(1): 6-9.  
ZHOU Wei-bo, ZENG Fa-chen. The Groundwater Level Forecast and the Rational Ratio Analysis for Irrigation District with Both Wells and Canals [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2006, 25(1): 6-9.
- [25] 张志杰, 杨树青, 史海滨, 等. 内蒙古河套灌区灌溉入渗对地下水的补给规律及补给系数[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(3): 61-66.  
ZHANG Zhi-jie, YANG Shu-qing, SHI Hai-bin, et al. Irrigation Infiltration and Recharge Coefficient in Hetao Irrigation District in Inner Mongolia [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(3): 61-66.
- [26] 徐旭, 黄冠华, 屈忠义, 等. 区域尺度农田水盐动态模拟模型: GSWAP [J]. *农业工程学报*, 2011, 27(7): 58-63.  
XU Xu, HUANG Guan-hua, QU Zhong-yi, et al. Regional Scale Model for Simulating Soil Water Flow and Solute Transport Processes: GSWAP [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(7): 58-63.