

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2014.06.002

地下水安全开采量的内涵及安全开采控制水位划定

王琨¹, 束龙仓², 刘波¹, 刘革¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 回顾和探讨了地下水允许开采量、可持续开采量和安全开采量的概念和内涵的演变, 综合考虑社会、经济、技术、资源等多方面约束, 定义了安全开采量, 并详细剖析了其区别于以往地下水开采资源量的内涵, 从开采程度、水文地质条件、社会发展要求三方面明确“安全”的标准, 提出了地下水安全开采因地制宜的思路, 并且将概念延伸到相应的安全开采控制水位, 实现地下水资源量预先调节, 初步阐述了基于逐月调节计算的地下水安全开采控制水位划定方法。

关键词: 地下水; 安全开采量; 控制水位; 评价方法

中图分类号: P641.8 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2014)06-0007-06

Connotations of safe yield of groundwater and determination of controlled groundwater level for safe exploitation

WANG Kun¹, SHU Longcang², LIU Bo¹, LIU Ge¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In this paper, we review and discuss the development of the meanings and connotations of permitted yield, sustainable yield, and safe yield of groundwater. With full consideration of social, economic, technical, and resources constraints, we give the definition of safe yield of groundwater and analyze its connotations, which are different from those of the groundwater exploitation amount. From the aspects of the degree of exploitation, hydrogeological conditions, and social development, we determine the criteria of safe exploitation, propose the idea of safe exploitation based on local conditions, and apply this idea to the determination of the controlled groundwater level, in order to realize pre-regulation of groundwater resources. In addition, we introduce a method for determining the controlled groundwater level for safe exploitation of groundwater based on monthly regulation.

Key words: groundwater; integrated safe yield; controlled groundwater level; evaluation method

地下水与地表水相比,水质较好、分布较广泛、动态变化较稳定且便于就地开发利用^[1],是人类理想的供水水源。但近些年来,由于地下水资源的不合理开发利用,造成了部分地区地下水水位持续下降、地面沉降、海水入侵、土地次生沙漠化等环境地质问题。为合理开发、保护地下水资源,遏制地下水资源的过度开发利用,从20世纪初开始,在地下水资源评价中,先后提出了 safe yield、允许开采量、可持续开采量、安全开采量等概念,作为地下水开发利用依据指导地下水开采,并不断进行理论的完善和演变。本文总结了大量国内外研究成果,回顾了地下水允许开采量、可持续开采量的发展历程,在明确安全开采量的定义的基础上,进一步发展其内涵,提出地下水安全开采控制水位及其评价方法。

作者简介:王琨(1990—),女,硕士研究生,研究方向为地下水开发利用及数值模拟。E-mail:wk19900421@126.com
通信作者:束龙仓,教授。E-mail:lcsu@hhu.edu.cn

1 地下水安全开采量概念的历史沿革

在指导地下水资源的开发利用工作中,国内外诸多学者相继提出并发展不同地下水资源量的概念,表 1 列举了 5 个最具代表性的概念首次被提出的论述。

1.1 开采资源量概念的国内外研究进展

继 Lee^[2] 最早在 1915 年提出 safe yield 的概念之后,国外学者相继提出 safe yield 的约束条件,不断补充其内涵:取水方案经济可行^[7];不消耗地下水补给地表水的量^[8];开采量不应超过年平均补给量,地下水水位下降不会引起地下水水质恶化^[9];考虑可能引起的水权纠纷^[10];不产生地下水储量减少、劣质水入侵、水权冲突、开采成本提高、诱发河水入渗、河水流量衰减和地面沉降等严重后果^[11-12]。

从 20 世纪初至 40 年代前后,传统的 safe yield 更加关注能使年平均地下水开采量和补给量达到和维持一个长期平衡的开采量,即以补给量来确定开采量。这一时期的允许开采量概念存在一定不足^[4-5,13-15],它没有充分考虑地下水生态、环境服务功能,长期按照允许开采量开采,将会导致河流、沼泽和泉水的枯竭,而超过补给的连续开采最终将破坏地下水补排平衡。

在国内,最早提出的是允许开采量(或可开采量)这一概念。允许开采量最先出现于冶金工业部主持编制的 TJ27—78《供水水文地质勘察规范》^[3],与补给量、储存量一起构成地下水储量的 3 个部分。刘光亚^[16]指出允许开采量和开采量的区别,解释了开采的地下水性质由“储量”向“资源”的转变。允许开采量的评价逐渐在地下水资源评价中占据重要地位。

允许开采量与 safe yield 的概念相近,在发展过程中内涵均逐渐包含了环境、经济、水权等^[7-12]。因此,部分学者仍沿用这两个概念^[6,17],并对其补充发展。另一部分学者^[4,13]主张提出一个更为科学合理的概念。

20 世纪后期,随着可持续发展理念的产生,开始提出并强调地下水开采过程的可持续性。

Meyer^[18]的论述中表明了动态性、不确定性、系统性等基本内涵;Bredehoeft 等^[19]则提出以地下水系统可达到新的平衡作为地下水可持续利用的重要标志,提供了动态平衡的思路;Alley 等^[4]强调地下水的可持续开采必须以满足环境需水优先为前提,并第一次提出 sustainability 这一概念。在国内,张人权^[17]强调了供水永续性和生态环境可承载性;王长申等^[5]第一次给出完整的可持续开采量定义,归纳了其内涵和特点。

可持续开采量同以往概念相比,不仅综合考虑多方面约束,且强调开采的可持续性和动态性。但可持续性在定义、量化和评价^[20]的过程中尚无统一的标准,如何定量反映地下水开采资源量与经济技术、生态环境之间的关系^[21],仍有待研究。

1.2 安全开采量的研究进展

近年来,随着气候变化的加剧和人类活动强度的不断加大,含水层、地表水体、生态系统的安全性得到了广泛关注,针对不同的地下水管理目标,安全开采量的概念在国内出现并同其他地下水开采资源量一起用以评价和指导地下水开采。

部分国内学者将 safe yield 直译为安全开采量^[6,20-21],在此基础上发展这一概念;除此之外,近些年国内重新提出安全开采量的概念,它在考虑了经济、技术、环境等方面因素的前提下,管理目标上相比可持续开采量更加侧重于“安全”。

王家兵等^[22]以天津市为例,提出了根据“安全”的目标来确定安全开采量的评价标准,指出在容易发生地面沉降的地区,“安全”的目标应是能使地面沉降控制在一定范围。类似地,罗照华等^[23]以郴州市某水源地为例,通过评价设计开采量的安全性与合理性来判断是否采纳其为安全开采量,从地质环境角度来确定“安全”的目标。

上述对于安全开采量的论述强调因地制宜,但均未具体确定“安全”的标准。朱雪芹等^[24]通过对

表 1 地下水开采资源量主要概念

概 念	提出时间	参考文献	论 述
Safe yield	1915	文献[2]	在不引起地下水储量严重消耗的前提下能从含水层中正常、连续抽取的最大水量
允许开采量	1978	文献[3]	通过技术经济合理的取水构筑物,在整个开采期内出水量不会减少,动水位不超过设计要求,水质和水温变化在允许范围内,不影响已建水源地正常开采,不发生危害性的工程地质现象的前提下,单位时间内从水文地质单元或取水地段中能够取得的水量
Sustainability	2004	文献[4]	在不产生严重的环境、经济和社会后果的情况下可以永续开发利用的地下水量
可持续 开采量	2007	文献[5]	在优先满足环境需水及经济、合法、不破坏原来水质、不产生不良环境后果的条件前提下,以地下水及其环境系统达新的平衡为标志,可以从地下水系统中开采的可更新水量
安全开采量	2010	文献[6]	安全开采量是在一定时期内,通过技术经济合理的取水方案,在不产生不能承受的生态环境问题,满足地下水的资源、生态环境和地质环境等功能的前提条件下,达到地下水资源可持续开发利用的最大开采量

地下水开采安全和警戒量的论述给出“安全”的标准,但与可持续开采量的约束条件并无显著差异。

王振龙等^[17]对安全开采量的内涵分析中不仅提出了不产生不可承受环境问题的要求,还进一步考虑了技术能力、经济水平和地下水更新能力制约,且突出其动态性。

可以看出,可持续开采量与安全开采量的内涵中均包含可持续发展的理念,但目前的研究中没有突出“安全”与“可持续”的区别。

由于管理中对于“可持续”或者“安全”的侧重点不同,因此本文提出的安全开采量和安全开采控制水位,在保留了动态性、系统性、不确定性基本内涵的基础上,有了进一步的发展,归纳整理于表2。

2 地下水安全开采量和安全开采控制水位

2.1 安全开采量的概念

理解安全开采量的内涵,首先要明确“安全”的概念。安全是与危险相对的,所谓安全即排除危险,没有绝对的安全。在实践中,安全性只要达到某种符合实际需求的程度和水平,就认为其是相对安全的,因此安全的标准并不固定。地下水开采的安全,其标准不仅取决于资源开采对环境的客观影响,还取决于技术、经济水平和人对资源的主观认识与需求等。

结合以往对于允许开采量、可持续开采量和安全开采量的研究,分析在实践中应用的可行性,将安全开采量定义为:在一定的技术经济条件下,不产生不能承受的环境地质问题,综合考虑社会、经济、生态、环境等因素,对不同的安全标准分别采取合理的取水方案,长期可持续开采的可更新水量。与之相对应的是地下水安全开采控制水位。

人类开发利用的地下水在质和量上均对人类社会的发展产生一定的作用,同时对环境产生一定的反馈,地下水开采力求实现其资源功能、生态功能及地质环境功能^[25]。此处提出的安全开采量从“自

然”和“人”两方面衡量地下水开采的安全性,地下水功能之间彼此关联、相互制衡,某一功能的过度强化会引起其他功能的相应削弱,充分满足生态环境、地质环境要求可能使得人类生产生活所需的供水不足,而按照最大取水能力取水长期必然破坏含水层乃至引发环境地质问题。因此,在针对环境的安全和针对人类社会的安全实现的权衡中,需要以地下水功能的承载能力为前提,满足协调人与自然、资源关系的生态环境需水^[26],统筹考虑供水能力、需求和取水方案三者之间的协调,结合地区发展需要,以地下水均衡为基础确定安全开采量。

2.2 安全开采量的内涵和安全开采控制水位的提出

地下水开采的安全性也包含了可持续的内涵。首先,基于可持续发展理念,安全开采量具有永续性和系统性,即开采能使地下水系统及时达到新的平衡状态,在相当长的时间内要维持水文系统、生态系统的功能不受不可逆转的影响。同时,安全开采量具有动态性,开采过程应结合年内、年际地下水动态,顺应地下水、地表水系统的调节作用变动,充分反映丰、枯水年交替出现的随机性。另外,安全开采量的评价需要综合考虑经济条件、水质要求、水位限制、水权及环境地质条件。安全开采量沿袭可持续思想,但不等同于可持续开采量。在前人研究的基础上,对安全开采量的具体内涵做了进一步阐述和完善。

2.2.1 “安全”的标准和管理目标

根据不同地区开采程度、水文地质条件、社会发展要求的不同,“安全”的标准和管理目标也不同。

a. 已超采地区和未超采地区。对于未超采地区,安全开采量重点在于“维持”,即采取的取水方案在保证一定地下水位的前提下不对地表水体、生态环境造成破坏。充分发挥地下水的调蓄作用,以丰补歉。而对于一些潜水超采地区,超采已经或者可能引发的一系列环境地质问题对人类安全构成威胁,但仍有继续开采的需求,安全开采的目标则是要

表 2 各种地下水开采量内涵对比

地下水 开采资源 量内涵	目 标	时间范围		研究对象				约束条件				其他特征			
		开采 期	开采 期后	含水层	地表 水体	生态地 质环境	社会 系统	不破坏 含水层	生态环 境约束	社会经 济约束, 可持续	管理目 标约束, 安全性	动态 性	不确 定性	水位 控制	预先 调节
safe yield	可供水量	✓		✓				✓							
允许开采量	最大	✓		✓	✓	✓		✓	✓						
可持续 开采量	社 会、经 济、环境综 合效益	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓		
安全 开采量	实现不同 目标下的 开采安全	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

注:“✓”表示具有该内涵。

实现“恢复”的作用,通过丰、枯季的调节在开采期和之后一段时期使地下水位逐渐抬升,地下水资源量逐渐恢复。

b. 不同水文地质条件使得地下水天然状态下埋深已经有所差异,此外含水层结构、地下水赋存形式、地下水补排条件的不同,在确定安全开采量时,要充分考虑到这些差异,即使在同一时期,不同地区也不能以同一开采量或控制水位为标准。要结合开采前后地下水水位、埋深变化,通过水位、水量关系对比分析来评价开采量的安全性。

c. 行政级别、发展战略重要程度以及需水量和需水结构不同的地区,即使地下水资源量和开采程度相近,“安全”的标准也有所差异。例如在生态保护区,对地下水开采管理极为严格,以维持当地生态系统的健康为主要目标,“安全”的标准就会定得很高;在大型城市和以农业为主的城市,居民饮用水水源、工农业用水水源对地下水的需求相对较大,对“安全”的标准要适当放宽以满足社会经济发展的需要;在一些地区,开采地下水有特殊用途,如沙漠地区开采石油需要在一段时间内动用储备地下水,在战略要求下,不得不暂时降低“安全”标准,此后逐步恢复地下水资源量。

d. “安全”的实现还是一个渐进的过程。唐克旺等^[26]在关于生态需水的论述中指出,生态需水的目标是在一定时空上保护和恢复生态环境,不仅涉及水资源总量,还需要径流过程。与此类似,在地下水资源管理中,使已超采地下水水位的回升一步到位是不可行的,安全开采量及其对应的开采过程即是要使地下水位分阶段回升,不同阶段安全的标准也不同。例如在开始恢复的阶段,在某一开采量下,地下水仍处于超采状态,但其超采程度有所缓和,即可认为此开采量是安全的。

在不同管理目标的约束下,实施安全开采的目标和程度不尽相同,这也体现出安全的相对性。当今的水资源系统和生态环境受人类活动的影响很大,因此地下水动态与天然条件下有显著差异。人类活动干预下的安全开采量评价不可能满足资源、环境、人类需求等目标同时最优,因此有必要因地制宜,选择性地突出主要目标。

2.2.2 安全开采控制水位

地下水水位是地下水管理的重要控制指标,直接表现了地下水资源量的多少^[27]。地下水安全开采控制水位是地下水安全开采量的直接反映。准确依照某一水量开采不易控制与管理,相比之下,利用观测井对地下水水位进行观测十分方便,也是开采量控制的重要依据。

若只确定地下水开采量的上限,就忽略了地下水位过高引起的诸如土地次生盐碱化和对建筑物地基破坏等危害。安全开采控制水位要求采用适当的开采方式使得地下水水位在一段时期内处于某一适宜区间内。

在划定安全开采控制水位时,要将“动态”和“安全”作为主要原则,并为地下水开采的管理和运行提供标准。

如图1所示,地下水的补给和排泄仅考虑降水和蒸发两项的前提下,仅在6月与10月之间地下水净补给量为正,从10月开始需要消耗含水层中蓄存的水量。假如从7月开始定量开采地下水,那么净补给量将在10月前就不足以满足开采,地下水储量较未开采状态提前减少,此时再减少开采量可能无法及时避免环境地质问题的发生,这种调节具有滞后性。按照以往多年补给、排泄量平均值,直接利用可开采系数与补给资源量相乘来确定开采量上限的方法进行定量开采^[17,20],不足以及时应对如开采条件下地下水补排条件突然改变或丰水年多余补给量无法满足连续几个枯水年天然排泄量和开采量之和所带来的影响。因此,安全开采控制水位应是随时间变化的一系列动态过程值,使得开采方案的调整能够对补给排泄的变化提前做出响应,使得调节由“弥补”转为“预防”。

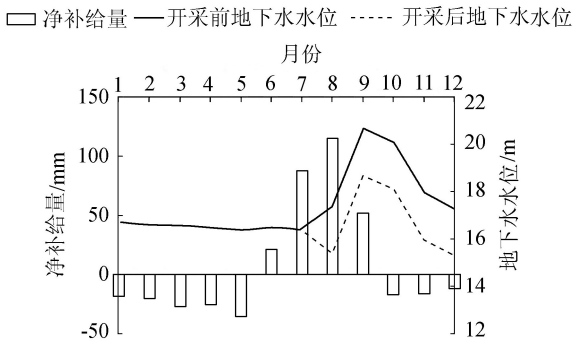


图1 未开采和开采状态下的地下水水位过程

在充分考虑到现状地下水水位、地下水各补给项、排泄项的前提下,要根据不同的需水结构、管理目标进行调整水位过程的变动趋势和波动区间。

2.2.3 与安全开采量相对应的安全开采方案

由于安全开采量的动态性和安全标准的不同,仅用1个安全开采量值为标准难以实现地下水开采安全。所以探讨的安全开采量,更注重的是一种以安全开采量值和安全开采水位为度量,结合一系列动态参照标准,在一段时期内针对一定区域采取的合理开采方式,即安全开采方案。确定合理的安全开采方式可以真正实现地下水系统从一个平衡状态达到另一个平衡状态的过程,以及过程中的补给量、

排泄量、水位、水质等属性的变化。

3 地下水安全开采控制水位的划定方法

含水层是天然的储水系统,其作用如同地下水库^[28],研究中参照地表水库的径流调节计算方法,收集连续多个平水年地下水补给、排泄、需水过程资料,计算地下水资源量,基于水均衡原理,采用安全开采系数法^[6]计算安全开采量,假定按照求得的安全开采量开采,绘制逐月地下水水位过程线,通过取上包线和下包线以及一系列修正来划定安全开采控制水位过程的上、下限(图2)。根据资料丰富程度、区域水文地质条件的不同,将当地安全开采管理目标作为约束条件,选取水均衡法、数值法、数理统计法等方法划定地下水安全开采控制水位和安全开采量。

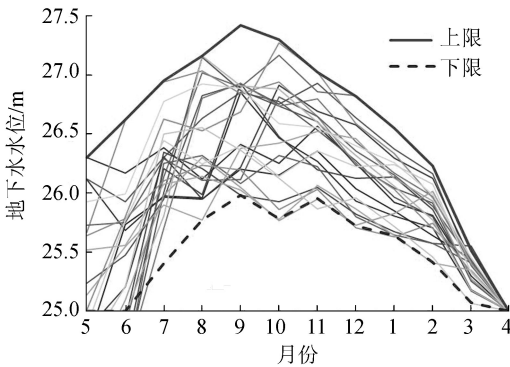


图2 地下水安全开采控制水位过程线

按照核算的安全开采量开采,若水位处于安全开采控制水位区间内,说明地下水处于多年平均采补均衡状态,不会对水文系统及地质环境造成不利影响。在开采条件下,地下水水位比天然状态下整体偏低,丰水期到来时水位上升滞后,而枯水期到来时水位下降提前,不同于取平均水位控制值的方法,安全开采控制水位逐时段划定,考虑到丰、枯季的差异,可以对即将到来的水位变化提前采取措施,动态调节。在不同的管理目标和区域用水条件差异的情况下划定安全开采控制水位,可通过地下水补给项和排泄项的选取、权重的确定、参数的调整等改变控制水位范围。

4 结 语

国外 safe yield 和国内允许开采量的概念由来已久,许多年来在地下水开采和管理工作中被广泛采用并不断补充发展。近些年来衍生出的安全开采量提出“安全”这一范畴来取代“可持续”,但事实上很难区分其中的差别,只是在概念表述上略有不同。

a. “安全”标准的确定。可持续开采量的目标是实现社会、经济、环境的综合效益,以生态环境的

可持续性为主要约束。地下水的资源、生态、地质环境功能之间和不同目标之间均相互制约,难以同时达到最优。与可持续开采量不同,安全开采量依据不同地区开采程度、水文地质条件、社会发展要求等约束条件,在同一地下水开采程度下,或以生态环境、地质环境安全为标准,或以人类生产安全为标准;在不同开采程度下,分阶段设定不同安全标准以达到地下水位逐步回升。即安全开采量采取因地制宜、突出主要目标的方式确定人类社会和自然环境的多方面“安全”标准,其中“安全”具有相对性。

b. 安全开采控制水位的提出。以往从 safe yield 到可持续开采量的研究,多着重于开采水量的计算与评价,地下水控制水位多根据植被情况、水文地质问题等划定几条关键控制水位线确定水位阈值,直接指导开采,与开采量的控制联系不大。在安全开采量的理论基础上提出更加直观反映地下水动态特征并且易于监督管理的安全开采控制水位,将水资源总量控制和水位控制相结合,实现动态管理。

c. 由“弥补”调节转为“预先”调节。以往按照水资源量与可开采系数相乘得到的地下水开采资源量进行开采,在地下水动态发生突变或者连续几个枯水年时,其滞后的调节难以避免环境地质问题的发生。安全开采控制水位以“安全”和“动态”为主要原则,用安全开采控制水位和安全开采量来评价和指导地下水开采,可提前对地下水动态变化做出合理高效的应对。

d. 安全开采控制水位的逐月调节划定方法。参照地表径流调节计算,将传统安全开采量的计算成果作为水位控制的依据,划定安全开采控制水位的上、下包线,结合当地的安全开采目标约束条件,再依此重新划定实际运行中的安全开采量,确定逐月安全开采过程。

从地下水的“允许开采量”到“可持续开采量”,再到“安全开采量”,不仅是一个概念不断完善、内涵不断补充的过程,还是一个对于合理的地下水开采由定性分析到定量计算,再到控制范围确定的过程。但是在工作中如何利用安全开采量这一概念来评价地下水开采的安全程度,如何运用水均衡法、数值法、数理统计法等方法来划定地下水安全开采控制水位,合理确定开采方案和监管方案,还需要进一步研究。

参考文献:

[1] 束龙仓,陶月赞. 地下水水文学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009:1-2.
[2] LEE C H. The determination of safe yield of underground

- reservoirs of the closed basin type [J]. Transactions American Society of Civil Engineering, 1915 (78): 148-151.
- [3] TJ27-78 供水水文地质勘察规范[S].
- [4] ALLEY W M, LEAKE S A. The journey from safe yield to sustainability[J]. Ground Water, 2004, 42 (1): 12-16.
- [5] 王长申, 王金生, 滕彦国. 地下水可持续开采量评价的前沿问题[J]. 水文地质工程地质, 2007 (5): 44-94. (WANG Changshen, WANG Jinsheng, TENG Yanguo. Advances in assessment of groundwater sustainable yield [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007 (5): 44-94. (in Chinese))
- [6] 王振龙, 鲁程鹏, 刘猛. 地下水安全开采量的概念与评价方法研究[J]. 水文, 2010, 30 (2): 14-20. (WANG Zhenlong, LU Chengpeng, LIU Meng. Concept and estimation of safe yield of groundwater systems [J]. Journal of China Hydrology, 2010, 30 (2): 14-20. (in Chinese))
- [7] MEINZER O E. Outline of groundwater hydrology, with definitions, water-supply paper 494 [R]. USA, USGS, 1923.
- [8] THEIS C V. The source of water derived from wells; essential factors controlling the response of an aquifer to development [J]. Civil Engineers, 1940, 10 (5): 277-280.
- [9] CONKLING H. Utilization of groundwater storage in stream system development[J]. Transactions American Society of Civil Engineering, 1946, 111 (1): 275-305.
- [10] BANKS H O. Utilization of underground storage reservoirs [J]. Transactions American Society of Civil Engineering, 1953, 118 (1): 220-234.
- [11] TODD D K. Groundwater hydrology [M]. New York: Wiley, 1959.
- [12] FREEZE R A, CHERRY J A. Groundwater [M]. New York: Prentice-Hall, 1979.
- [13] SOPHOCLEOUS M. From safe yield to sustainable development of water resources: the Kansas experience [J]. Journal of Hydrology, 2000, 235 (1/2): 27-43.
- [14] KAZMANN R G. Safe yield in groundwater development, reality or illusion [J]. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 1956, 82 (3): 1-12.
- [15] THOMAS H E. The Conservation of Ground Water [M]. New York: Mc Graw-Hill, 1951: 98-100.
- [16] 刘光亚. 关于地下水资源的概念和评价问题[J]. 河北地质学院学报(现刊名为石家庄经济学院学报), 1979 (1): 64-69. (LIU Guangya. The concept and evaluation of groundwater resources [J]. Journal of Hebei College of Geoscience (now renamed as Journal of Shijiazhuang University of Economics), 1979 (1): 64-69. (in Chinese))
- [17] 张人权. 地下水资源特性及其合理开发利用[J]. 水文地质工程地质, 2003, 30 (6): 1-5. (ZHANG Renquan. Characteristics of groundwater resources and their reasonable development [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2003, 30 (6): 1-5. (in Chinese))
- [18] MEYER J L. Changing concepts of system management [M]. Washington DC: Proceeding National Academy Press, 1993: 78-91.
- [19] BREDEHOFT J. Safe yield and the water budget myth [J]. Ground Water, 1997, 35 (6): 929.
- [20] 黄鹏飞, 刘昀竺, 王忠静. 从概念演进重新审视地下水可持续开采量[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2012, 52 (6): 771-777. (HUANG Pengfei, LIU Yunzhu, WANG Zhongjing. Recertification of groundwater sustainable yield from concept revolution [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2012, 52 (6): 771-777. (in Chinese))
- [21] 迟宝明, 施枫芝, 王福刚, 等. 流域地下水可持续开采量的定义及评价体系[J]. 水资源保护, 2009, 25 (5): 5-9. (CHI Baoming, SHI Fengzhi, WANG Fugang, et al. Definition and evaluation system of groundwater sustainable yield in watershed [J]. Water Resources Protection, 2009, 25 (5): 5-9. (in Chinese))
- [22] 王家兵, 崔爱敏. 天津深层地下水安全开采量[J]. 中国国土资源经济, 2007 (7): 32-34, 49. (WANG Jiabing, CUI Aimin. Safe output of the deep groundwater in Tianjin [J]. Natural Resource Economics of China, 2007 (7): 32-34, 49. (in Chinese))
- [23] 罗照华, 夏军辉. 论郴州市北湖地下水水源地的安全开采量[J]. 地下水, 2008, 30 (6): 56-58. (LUO Zhaohua, XIA Junhui. Discussion of safe yield of groundwater source in Chenzhou City [J]. Ground Water, 2008, 30 (6): 56-58.
- [24] 朱雪芹, 文丽杰, 孟庆国. 哈尔滨市地下水开采安全警戒量的研究[J]. 水文, 2006, 23 (3): 37-39. (ZHU Xueqin, WEN Lijie, MENG Qingguo. Study on the safety warning-volume of groundwater mining in Harbin City [J]. Journal of China Hydrology, 2006, 23 (3): 37-39. (in Chinese))
- [25] 张光辉, 严明疆, 杨丽芝, 等. 地下水可持续开采量与地下水功能评价的关系[J]. 地质通报, 2008, 27 (6): 875-881. (ZHANG Guanghui, YAN Mingjiang, YANG Lizhi, et al. Relationship between the groundwater sustainable yield and groundwater function assessments [J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27 (6): 875-881. (in Chinese))
- [26] 唐克旺, 王浩, 王研. 生态环境需水分类体系探讨[J]. 水资源保护, 2003 (5): 5-8. (TANG Kewang, WANG Hao, WANG Yan. Discussion on classification system of ecological environment water demand [J]. Water Resources Protection, 2003 (5): 5-8. (in Chinese))
- [27] 谢新民, 柴福鑫, 颜勇, 等. 地下水控制性关键水位研究初探[J]. 地下水, 2007, 29 (6): 47-50, 64. (XIE Xinmin, CHAI Fuxin, YAN Yong, et al. Preliminary study on critical depth of ground water table [J]. Ground water, 2007, 29 (6): 47-50, 64. (in Chinese))
- [28] 季叶飞. 安徽淮北地区浅层地下水安全开采量及安全开采潜力研究[D]. 南京: 河海大学, 2011.

(收稿日期: 2014-01-07 编辑: 高渭文)