

生态用水的基本理论与计算方法

杨爱民¹, 唐克旺¹, 王浩¹, 刘小勇²

(1. 中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100044;

2. 水利部水利水电规划设计总局 水战略研究中心, 北京 100011)

摘要: 在总结分析前人研究工作的基础上, 首次提出了界定生态用水须遵循的基本原则。据此, 对生态用水、生态需水和生态缺水的概念进行了科学界定, 并讨论分析了他们之间的相互关系; 提出一套完整的生态用水的分类系统; 提出水土保持、植被、城市等河道外生态用水的计算方法; 以位于黄土高原地区的延安市为例, 对其2001年水土保持生态用水和城市绿地生态用水进行了计算。

关键词: 生态用水; 生态需水; 生态缺水; 黄土高原; 河道外

中图分类号: X143 **文献标识码:** A

生态用水的研究, 国外始于20世纪70年代, 并且只注重河道内的研究, 而在我国则是90年代以后, 随着经济、社会和生态环境可持续发展战略的实施才受到广泛的关注, 并且研究领域比国外宽泛得多, 不但重视河道内的研究, 还重视河道外的研究。然而, 不论是国外还是国内, 有关生态用水概念的界定、类型的划分和计算方法等基础理论均不统一, 可操作性差, 难以在水资源优化配置和生态环境建设的实践中得到应用。因此, 加强生态用水概念、分类、计算方法等基础理论的研究是发展资源水利、可持续发展水利的迫切需要, 也是实现人与自然和谐共处理念的迫切需要。

1 生态用水概念不同界定产生的原因分析

目前, 国内外在生态用水研究中, 所采用的概念除生态用水、生态需水外, 还有环境用水与环境需水、生态环境用水与生态环境需水等。对这些概念的界定多达20余种, 由于所界定的概念不同, 其分类和计算方法自然也就不同。不同研究之所以产生不同的界定, 究其原因主要有: (1) 研究的对象不同, 对概念内涵的理解自然会产生差异。如汤奇成、沈清林、贾宝全、王让会、董增川、王芳、左其亭、王根绪、夏军等^[1-9]以干旱半干旱地区为研究对象, Vannote R. L.、Gore J. A.、Book P. J.、Petts G. E.、Gleick P. H.、Ni enhui s P. H.、李丽娟、严登华、丰华丽、倪晋仁和石伟等^[10-20]以河流为研究对象, 崔保山、刘静玲等^[21, 22]以湖泊、湿地为研究对象, 沈国舫、王礼先、王浩等人^[23-25]界定的广义生态环境用水则以地球生物化学循环(包括水热、水沙、水土和水盐平衡等)为研究对象, 杨志峰、许新宜、宋炳煜等^[26-28]以生态系统为研究对象。(2) 对水资源内涵的理解不一。如在左其亭^[7]和沈国舫、王礼先、王浩等^[23-25]定义的广义生态用水或生态环境用水的概念中, 水资源是指广义的水资源, 即包括: 地表水、地下水和土壤水。而在其他学者定义的概念中, 水资源一般是指传统的, 即狭义的水资源, 仅包括地表水和地下水。由于作为生态环境系统中重要的生物组分植被是直接吸收利用土壤水的, 水资源应该是指广义水资源。(3) 对需水和用水内涵的认识不同。如王芳^[6]和杨志峰^[26]等认为用水是指现状实际利用的水量, 需水则是指未来某一时段所需要的水量, 而有的学者对需水和用水则不加以区分。(4) 对生态、环境和生态环境内涵的理解有差异。多数

收稿日期: 2004-01-08

基金项目: 全国水资源综合规划专题(01-06-02); 十五国家科技重点攻关项目(2001BA610A-01)

作者简介: 杨爱民(1963-), 男, 内蒙古扎来特旗人, 博士, 主要从事水资源、水土保持等方面研究。

研究认为生态与环境是密不可分的,杨志峰^[26]、许新宜^[27]等对生态和环境加以区分,认为生态是指生态系统中的有生命的生物组分,而环境则是指生态系统中的非生命的无机组分。

2 有关生态用水概念的界定

2.1 概念界定的原则 (1)具有通用性。指所界定的概念不应因研究对象范围的不同,而产生歧义。由于生态系统可以有不同尺度的,小到有生命存在的一滴水,大到整个地球,不论研究对象是干旱半干旱的内陆地区、河流、湖泊、湿地,还是生物地球化学循环等均可归结为生态系统。(2)具有可匹配性。指与“三生”用(需)水相应概念的内涵须相互匹配。由于生活用水、生产用水分别不同于生活需水、生产需水,因此生态用水也应不同于生态需水。另外,由于生活用水、生产用水与生活需水、生产需水均可指过去、现状和未来某一时段实际利用的水量和一定生活、生产目标下需要的水量,生态用水、生态需水也均可用于过去、现状和未来三种时间状态。(3)水资源须基于广义水资源。在我国6.2万亿 m^3 的总降水中,形成狭义水资源的量仅占45%,而55%的总降水变成土壤水或通过蒸散发消耗掉。因此,将土壤水纳入水资源当中,才能全面、科学地研究生态用水问题。(4)科学地辨析生态、生态环境和环境的内涵。生态和生态环境的内涵是等同的,均指人类种群周围空间中直接或间接影响人类生存、生活和发展的各种自然因素的总体,即为自然环境或称生态系统,包括阳光、温度、气候、地磁、空气、水、岩石、土壤、地壳的稳定性等无机组分和动物、植物、微生物等有机组分。而环境的内涵具有更广的范畴,不仅包括自然环境,还包括社会制度、政治、法律、宗教、人工建筑物等社会环境。因此,建议统一采用生态用水或生态环境用水和生态需水或生态环境需水的概念。(5)具有可计算性。指所界定的概念物理意义明确,其量值便于计算。

2.2 概念的界定

2.2.1 生态用水(ecological water use) 是指在特定的时空范围内,其生态系统维持一定的稳定状态时所实际利用的水量(包括地表水、地下水和土壤水量)。生态用水亦称为生态环境用水(ecological environment water use)。对于不进行人工补水的生态系统,即降水性生态用水类型,其生态用水也可特指其占用的狭义水资源量(地表水和地下水量),此时也可称生态减水(量)(ecological water reduction)。生态用水从人工供水的角度来研究生态系统与水资源间的关系。生态用水不一定是合理的水量,尤其在水资源相对匮乏的地区更是如此。

2.2.2 生态需水(ecological water requirement) 是指在一定的生态保护、恢复或建设目标下,在特定的时空范围内,其生态系统维持良好的稳定状态时所需要的水量(包括地表水、地下水和土壤水量)。生态需水也称生态环境需水(ecological environment water requirement)。生态需水从生态系统本身的角度来研究生态系统与广义水资源间的关系。生态需水与相应的生态保护、恢复或建设目标直接相关,生态保护、恢复或建设目标不同,生态需水就会不同。生态需水是相对合理的水量。

2.2.3 生态缺(亏)水(ecological water deficiency) 在水资源相对匮乏的地区,一般情况下,生态需水与生态用水的关系是生态需水大于生态用水。生态需水与生态用水之差称为生态缺水。生态缺水是需要人工补充供给的水量。对于径流性生态需水,生态缺水也称生态补水(ecological water supply)。

上述概念中的空间范围可大可小,可以是流域,也可以是区域;时间范围即时段长短,可以是秒、分、小时、月或年。对于河道内生态用水、生态需水和生态缺水而言,其计算时段常用秒来表示,即三者的单位同流量单位,也就是 m^3/s ;对于河道外生态用水、生态需水和生态缺水而言,其计算时段常用年来表示,即三者的单位为 $10^4 m^3/年$ 、 $10^8 m^3/年$ 。

3 生态用水的分类

生态用水的分类系统见表1。生态需水的分类系统与生态用水的相同，只要将表1中的用水替换为需水便可。降水性生态用水是指其水分来源完全靠降水补给，而径流性生态用水的水分来源靠径流和降水共同补给。前者不受水资源开发利用的影响，但它直接影响径流的形成和分配，间接占用狭义水资源，而后者则受水资源开发利用的影响。对于未指明是降水性还是径流性的，均属于径流性生态用水。水土保持措施一般不进行灌溉，即使进行灌溉，利用的也是水土保持措施本身拦蓄的径流，因此水土保持生态用水均属于降水性生态用水。

表1 生态用水分类系统

一级分类(依据空间位置不同)	二级分类(依据生态系统类型不同)	三级分类(依据生态功能不同)
河道内生态用水	河道生态用水	生态基流水 冲沙用水 稀释净化用水
	河口生态用水	冲淤保港用水 防潮压咸用水 河口生物用水
河道外生态用水	水土保持生态用水	降水性人工造林(乔灌)用水 降水性人工种草用水 降水性淤地坝地用水 降水性梯田用水
	防护林草生态用水	降水性农田防护林用水 径流性农田防护林用水 降水性防风固沙林用水 径流性防风固沙林用水 其他降水性防护林草用水 其他径流性防护林草用水
	城市生态用水	绿地用水 河湖用水 环境卫生用水
	湖泊生态用水	最小水位用水 水生植物用水 稀释净化用水
	湿地生态用水	生物栖息地用水 沿岸带及沼泽湿地用水 稀释净化用水
	地下水回灌生态用水	地下水回灌用水

4 河道外生态用水的计算方法

生态用水的计算，对于降水性生态用水类型而言，通常是计算其生态减水，而对于径流性生态用水类型而言，通常是计算其生态补水。

4.1 水土保持生态用水的计算方法 由于水土保持措施一般不进行灌溉，计算水土保持生态总用水没有实际意义，而有意义的是计算水土保持间接占用狭义水资源的量，可采用定额法计算

$$W_k = \frac{1}{10000} q_k \times A_k \quad (1)$$

式中： W_k 为第k类水土保持措施生态用水量，或称生态减水量、生态占用水量(万 m^3)； q_k 为第k类水土保持措施生态用水定额(或称生态占用水定额)(m^3/hm^2)，k为梯田、坝地、造林、种草等， q_k 值可采用水保法，根据典型径流小区试验资料，经过消除大区(流域)和小区的点面差异和地区差异而确定^[29]； A_k 为第k类水土保持措施有效保存面积(hm^2)。

4.2 植被生态用水的计算 水土保持造林种草和防护林草生态用水的计算方法相同，可统称为植被生态用水计算方法。植被生态用水计算方法分为两种：一是径流性植被生态用水计算方法；一是降水性植被生态用水计算方法。

4.2.1 径流性植被生态用水计算方法 通常是计算生态补水，采用定额法

$$W_i = \frac{1}{10000} q_i \times A_i \quad (2)$$

式中： W_i 为第i类植被年平均生态用水量，或称生态补水量(万 m^3)； q_i 为第i类植被年平均灌溉定额(m^3/hm^2)，i为乔木、灌木、草本； A_i 为第i类植被面积(hm^2)。 q_i 值可按式(3)确定

$$q_i = 10(ET_i - P_i) \quad (3)$$

其中： ET_i 为第i类植被年平均蒸散发量(mm)，可通过实验或式(4)确定； P_i 为第i类植被生长期年平均降水量(mm)，当 $ET_i < P_i$ 时，不需要灌溉。

$$ET_i = k_i \times ET_0 \quad (4)$$

式中： k_i 为第i种植物系数； ET_0 为参考植物蒸散量(mm)，其值只与气象因素有关， ET_0 可采用国际粮农组织(FAO)推荐的彭曼-蒙蒂斯(Penman-Monteith)方法计算。

4.2.2 降水性植被生态用水计算 通常是计算生态减水，有两种计算方法，一种是定额法，另一种是水保法。水保法参见水土保持生态用水计算方法。采用定额法

$$W_j = \frac{1}{10000} q_j \times A_j \quad (5)$$

式中： W_j 为第j类植被年平均生态用水量，或称生态减水量、生态占用水量(万 m^3)； q_j 为第j类植被年平均生态用水定额(或称生态占用水定额)(m^3/hm^2)，j为乔木、灌木、草本； A_j 为第j类植被面积(hm^2)。

4.3 城市生态用水的计算

4.3.1 城市绿地生态用水的计算 通常是计算生态补水，采用定额法

$$W_{\text{绿地}} = \frac{1}{10000} q_{\text{绿地}} \times A_{\text{绿地}} \quad (6)$$

式中： $W_{\text{绿地}}$ 为绿地生态用水量，或称生态补水量(万 m^3)； $q_{\text{绿地}}$ 为绿地灌溉定额(m^3/hm^2)； $A_{\text{绿地}}$ 为绿地面积(hm^2)。

城市绿地一般可分为行道树和草坪，多数情况下行道树和草坪混种，因此，二者容易区分的城市可将细分为 $q_{\text{行道树}}$ 和 $q_{\text{草坪}}$ ，而二者不容易区分的城市可取其平均值，即定额仍为 $q_{\text{绿地}}$ 。

4.3.2 城市河湖生态用水计算 采用水量平衡法。

水面蒸发量：

$$Q_e = 10 \times A \times E \quad (7)$$

式中： Q_e 为水面蒸发消耗量(m^3)； A 为水面面积(hm^2)； E 为当地蒸发能力(mm) (E_{601})。

水体渗漏量：

$$Q_s = 10 \times A \times r \quad (8)$$

式中： Q_s 为水体渗漏量(m^3)； A 为水面面积(hm^2)； r 为年渗漏水深(mm) (按照河湖河床上沉积物的渗透系数计算)

河湖总需水量：

$$Q_h = Q_e + Q_s + V \times f \quad (9)$$

式中： Q_h 为城市河湖总需水量(m^3)； V 为城市河湖水体体积(m^3)； f 为换水周期(次/年)。

4.3.3 城市环境卫生生态用水 按照定额法计算

$$W_{\text{环卫}} = A_{\text{环卫}} \times q_{\text{环卫}} \quad (10)$$

式中： $W_{\text{环卫}}$ 为城市环境卫生生态用水量(m^3)； $A_{\text{环卫}}$ 为建城区面积(hm^2)； $q_{\text{环卫}}$ 为环境卫生用水定额(m^3/hm^2)，采用历史资料和现状调查法确定。

4.4 流域或区域生态用水的计算 流域或区域河道外生态用水包括两类：生态减水和生态补水。前者不参与水资源供需平衡分析，而后者则参与水资源供需平衡分析，因此二者不能直接相加，要分别计算。

5 延安市河道外生态用水的计算

5.1 延安市概况 该市位于黄土高原腹地，地处东经 $107^\circ 40' \sim 110^\circ 31'$ 和北纬 $35^\circ 31' \sim 37^\circ 30'$ 之间，辖1区12县，2001年总人口198.15万人，总面积 $36712km^2$ ，其中水土流失面积 $28773km^2$ ，占幅员面积的78.37%。年均输入黄河泥沙达2.58亿t，是黄河中游水土流失最严重的地区之一。主要河流有清涧河、延河、云岩河、仕望河和北洛河，其中前三条是入黄的一级支流，第四条是入黄河的二级支流，入渭河的一级支流。延安市水资源极为短缺，境内地表水多年平均径流量 $14.34亿m^3$ ，地下水资源总量 $6.45亿m^3$ ，扣除与地表径流的重复量 $6亿m^3$ ，加上过境客水 $1.75亿m^3$ ，水资源总量为 $16.5亿m^3$ ，人均水资源量只为全国平均值的34.2%。

表2 延安市所属流域水土保持生态用水定额(单位： m^3/hm^2)

流域	梯田	造林	种草	坝地
无定河	351	177	195	7797
清涧河	409	260	175	5942
延河	537	401	285	4222
云岩河	251	162	122	3936
仕望河	254	140	123	1867
北洛河	590	335	161	4967
其他1	252	151	123	2960
其他2	422	238	142	2960

5.2 水土保持生态用水的计算 根据式(1)与表2及水土保持措施保存面积，经计算得到延安市水土保持生态用水，即生态减水计算结果表(表3)。植被生态用水涵盖在水土保持造林、种草之中。由表3可知，2001年延安市水土保持生态用水量为 $31022.95万m^3$ ，其中梯田、人工造林、人工种草、坝地分别为 $2779.08万m^3$ 、 $17378.35万m^3$ 、 $3682.56万m^3$ 和 $7182.96万m^3$ 。在进行水资源总量评价时应将 $31022.95万m^3$ 的水土保持生态用水量还原。

表3 延安市水土保持生态用水计算结果(2001年)(单位:万 m^3)

县(区)名称	所属流域	梯田	造林	种草	坝地
宝塔区	延河	302.44	1287.05	208.59	661.59
	云岩河	111.52	463.30	44.94	184.60
	小计	413.96	1750.35	253.53	846.19
延长县	延河	162.44	1891.92	113.20	810.20
延川县	清涧河	184.70	634.79	88.69	977.46
子长县	无定河	96.10	412.43	146.07	971.51
	清涧河	267.65	760.34	32.81	1189.59
	小计	363.75	1172.77	178.88	2161.10
安塞县	延河	520.84	2752.54	157.46	461.89
志丹县	延河	154.23	1490.36	86.58	264.30
	北洛河	244.56	1788.97	64.42	418.72
	小计	398.79	3279.33	151.00	683.02
吴旗县	无定河	51.42	498.17	30.73	470.94
	北洛河	310.87	1581.00	4.77	412.76
	小计	362.29	2079.17	35.50	883.70
甘泉县	北洛河	135.94	498.38	16.71	90.40
富县	北洛河	44.90	901.99	36.61	91.40
洛川县	北洛河	151.98	978.37	13.65	1.49
宜川县	云岩河	4.82	148.98	12.66	81.87
	仕望河	11.99	219.22	9.53	76.36
	其他1	0.91	178.63	7.20	0
	小计	17.72	546.83	20.39	158.23
黄龙县	北洛河	1.59	47.57	2.56	17.88
	仕望河	4.67	107.18	0.59	0
	其他2	8.23	194.28	6.13	0
	小计	14.49	349.55	9.28	17.88
黄陵县	北洛河	7.28	541.53	25.95	0
合计		2779.08	541.53	3682.56	7182.96
总计			31022.95		

5.3 城市绿化生态用水的计算 根据式(6), 经计算得到, 2001年延安市建城区绿地生态用水, 即生态补水781.65万 m^3 。目前, 延安市建城区绿地生态补水量远远小于781.65万 m^3 , 大大抑制了绿地生态功能的发挥。

6 结论

(1)提出了界定生态用水须遵循的基本原则。据此, 对生态用水、生态需水和生态缺水的概念进行了界定, 并讨论分析了他们之间的相互关系。(2)把生态用水分为三级, 一级包括2大类, 二级包括8类, 三级包括26类。(3)提出水土保持、植被和城市等河道外生态用水的计算方法。这些方法可操作性强。(4)以位于黄土高原地区的延安市为例, 对其2001年水土保持生态用水和城市绿地生态用水进行了计算。其结果为水土保持生态用水、城市绿地生态用水分别为31022.95万 m^3 和781.65万 m^3 。

参考文献：

- [1] 汤奇成. 绿洲的发展与水资源的合理利用[J]. 干旱区资源与环境, 1995, 9(3): 107-111.
- [2] 沈清林, 李宗礼, 王以佐. 民勤绿洲生态用水量初步研究[A]. 见: 许新宜主编. 水资源可持续管理问题研究与实践[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1998. 126-129.
- [3] 贾保全, 许英勤. 干旱区生态用水的概念和分类[J]. 干旱区地理, 1998, 21(2): 8-12.
- [4] 王让会, 宋郁东, 樊自立, 等. 塔里木流域“四源一干”生态需水量的估算[J]. 水土保持学报, 2001, 15(1): 19-22.
- [5] 董增川, 刘凌. 西部地区水资源配置研究[J]. 水利水电技术, 2001, 32(3): 1-4.
- [6] 王芳, 梁瑞驹, 等. 中国西北地区生态需水研究(1)—干旱半干旱地区生态需水理论分析[J]. 自然资源学报, 2002, 17(1): 1-8.
- [7] 左其亭. 干旱半干旱地区植被生态用水计算[J]. 水土保持学报, 2002, 16(3): 114-117.
- [8] 王根绪, 程国栋. 干旱内陆流域生态需水量及其估算[J]. 中国沙漠, 2002, 22(2): 129-134.
- [9] 夏军, 郑冬燕, 刘青娥. 西北地区生态环境需水估算的几个问题探讨[J]. 水文, 2002, 22(5): 12-17.
- [10] Vannote R L, Minshall G W, Cummins K W. The river continuum concept[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1980, (37): 130-137.
- [11] Gore J A. Setting priorities for minimum flow assessments in southern africa[J]. South African Journal of Science, 1989(a), 85: 614-615.
- [12] Book P J, et al. River Conservation and management[M]. John Wiley & Sons Ltd., 1992.
- [13] Petts G E. Water allocation to protect river ecosystem[J]. Regulated Rivers: Res Management, 1996, (12): 353-365.
- [14] Gleick P H. Water in crisis: paths to sustainable water use[J]. Ecological Applications, 1998, 8(3): 571-579.
- [15] Nienhuis P H. New concepts for sustainable management of river basins[M]. Netherlands: Backuys Publishers, 1998.
- [16] 李丽娟, 郑红星. 海滦河流域河流系统生态环境需水量计算[J]. 地理学报, 2000, 55(4): 495-500.
- [17] 严登华, 何岩, 邓伟, 等. 东辽河流域河流系统生态需水研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(1): 46-49.
- [18] 丰华丽, 王超, 李勇. 流域生态需水量的研究[J]. 环境科学动态, 2001, (1): 27-30.
- [19] 倪晋仁, 崔树彬, 等. 论河流生态环境需水[J]. 水利学报, 2002, (9): 14-26.
- [20] 石伟, 王光谦. 黄河下游生态需水量及其估算[J]. 地理学报, 2002, 57(5): 595-602.
- [21] 崔宝山, 杨志峰. 湿地生态环境需水量研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(2): 213-218.
- [22] 刘静铃, 杨志峰. 湖泊生态环境需水量计算方法研究[J]. 自然资源学报, 2002, 17(5): 604-609.
- [23] 沈国舫, 王礼先. 中国生态环境建设与水资源保护利用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.

- [24] 王礼先. 生态环境用水的界定和计算方法[J]. 中国水利, 2002, (10): 28-30.
- [25] 王浩, 陈敏建, 秦大庸, 等. 西北地区水资源合理配置和承载能力研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003.
- [26] 杨志峰, 崔宝山, 等. 生态环境需水量理论、方法与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [27] 许新宜, 杨志峰. 试论生态环境需水量[J]. 水利规划与设计, 2003, (1): 21-26.
- [28] 宋炳煜, 杨劫. 关于生态用水研究的讨论[J]. 自然资源学报, 2003, 18(5): 617-625.
- [29] 冉大川, 柳林旺, 等. 黄河中游河口镇至龙门区间水土保持与水沙变化[M]. 郑州: 黄河出版社, 2000.

Theory and calculation method of ecological water use

YANG Ai-min¹, TANG Ke-wang¹, WANG Hao¹, LIU Xiao-yong²

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China;

2. General Institute of Water Resources Planning, Beijing 100011, China)

Abstract: The basic principle for defining the ecological water use is proposed. On this basis the definitions of ecological water use, ecological water requirement and ecological water deficiency are defined and the relationships among them are analyzed. An integrated set of classification system for ecological water use is suggested. The method for calculating the off-stream ecological water use including the water consumptions for soil and water conservation, vegetation and urban green land is developed. The calculation of ecological water use for different purposes in Yanan City, located at the loess plateau area, is taken as a case study to demonstrate the proposed method.

Key words: ecological water use; ecological water requirement; ecological deficiency; off-stream; Yanan City