

中国的水循环、水资源与生态保护

刘 昌明

<中国科学院地理科学与资源研究所>

摘 要

本文从水文循环研究的角度出发,结合生态与环境保护的问题,对中国水资源的开发、利用与管理的主要方面进行了探讨与分析,提出防治生态退化、环境可持续的若干思考与建议。

关键词 主观生活质量、现状与测量、社会指标构建、保护、水资源可持续利用管理

1. 中国水文循环的一般特征

中国大陆主要处于北半球中纬地带。在外流区流域的水量平衡要素中,降水的数量与世界大陆外流区几乎相同。但是,径流量偏高而蒸散发量(陆面蒸发)偏低。中国内陆区靠近欧亚大陆的腹地,内陆和流域的水量平衡要素值均比世界大陆的内陆区偏低(见表1),因此,中国的内陆区显得特别干旱。比较中国的水量平衡要素结构,降水量与蒸散发量均比全球大陆的平均值小,但径流量却相对偏高,径流系数($R/P=0.43$)比全球大陆($R/P=0.36$)大20%。造成这种现象的原因与我国的地貌和气候条件有关。中国是一个多山的国家,山地有利于径流的形成。此外,中国在季风气候影响下,降水集中,汛期洪水频繁,也会使径流量增加。全国平均年降水量比全球大陆仅偏低大约4%,原因是中国西北部干旱与半干旱区域的面积较大,约占全国面积的1/3以上。但是,全国年平均实际蒸散发量比全球大陆偏低较多,大约低20%左右,除因内陆干旱区实际蒸散发量小外,主要与我国多山特点有关。我国的山区,不管是外流区还是内陆区,蒸散发量均比其外围地区低得多。

表1 中国水量平衡要素表^[1]

水量平衡要素	P (毫米)	R (毫米)	ET (毫米)	R/P	ET/P	备注
中国	630	270	360	0.43	0.57	世界大陆数据按文献[1]
世界大陆	730	260	471	0.36	0.64	
中国外流区	896	403	493	0.45	0.55	
世界外流区	873	320	553	0.37	0.63	
中国内陆区	164	0	164	0	0	
世界内陆区	231	0	231	0	0	

我国主要河流的水量平衡的差异反映出地理位置的影响。不仅西北内陆河流,甚至所有北方较大的外流河流都是年实际蒸散发量大于年实际径流量,如松花江、海河、黄河与淮河等,而淮河以南的大河流域实际蒸散发量都等于或小于实际径流量,如长江、珠江及青藏高原的雅鲁藏布江等,其中雅鲁藏布江的径流量比蒸散发量大两倍以上,这是由于它源出高山区,径流形成的条件极为有利,同时也包含较多的高山冰川融水补给。中国的水文循环与水量平衡与降水地带有以下的基本关系:

- (1) 当降水量(P)很大时($p>1200$ 毫米),因为年蒸散发量随年降水量的增长甚小,年蒸散发量的增率接近于零,显然,在这种情况下径流随降水增长呈线性关系,即年径流量的变化几乎完全取决于年降水量的变化。两者间有最为密切的相关,径流量的变化与蒸散发量的变化无关。此时,年

降水径流关系曲线图上的斜率与降水线平行。

- (2) 当年降水量 (P) 很小时 (P < 200 毫米), 与以上相反, 年径流量的变化随年降水量的变化甚小, 其增率近乎于零, 说明降水量很小的时候, 蒸散发是水量平衡的主要项。年蒸散发量变化与年降水量有最密切的关系。在这种情况下, 径流量在水量平衡的组成中比例很小。而蒸散发与降水相近。水量交换呈垂直方向。
- (3) 年降水量大致在 1200~1300 毫米间时, 水量平衡中的年径流量与年蒸散发量大致相等, 即各取年降水量的一半左右。
- (4) 在年降水量小于 1200 毫米的地区, 水量平衡中的年蒸散发量大于年径流量; 在年降水量大于 1200 毫米的地区, 年径流量可大于年蒸散发量。按年降水量图, 由 P=1200 毫米等值线划分, 可以看出中国广大地区的水量平衡要素对比的特点是年蒸散发量大于年径流量。
- (5) 从中国的水量平衡结构来看, 在中国南方湿润多雨山区, 采用由降雨量推算流域的年径流, 可望获得较好的效率; 其余地区则需考虑蒸散发的因素, 特别是北方干旱少雨的地区, 在年径流量计算模式的建立中, 蒸发参数的确切计算是非常重要的。

中国平原地区的循环特征与山区不同, 水循环与水交接的方向更明显以垂直方向为主。中国东部的平原面积约为 100 万 km², 约占全国面积的 10%, 它们是东北大平原, 面积为 35 万 km², 华北平原, 面积为 35 万 km², 长江中下游平原, 大约为 30 万 km²。中国平原地区的水循环特点是蒸散发量远远大于径流, 不论是北京还是南方都是如此, 尤其是华北平原的北部, 即黄河以北海河平原, 年蒸散发量要占年降水量的 90%, 而年径流量只占年降水量的 10%。从水文循环的方面分析, 中国平原区的水量交换是以垂直方向为主, 即大气降水量落到地面以后, 其绝大部分又以蒸散发返回大气之中。大气降水、地下水与土壤水三种水量的垂直交换是平原区水量平衡的一个主要特征。

2. 中国水资源储量与水循环交换期估算

根据水文气象资料与文献资料进行分析与综合, 可以得出中国各种形式水体的储量 (表 2)。

表 2 我国水储量与交换期^[1]

项目		面积 (平方公里)	水量		年循环量 (立方公里/年)	交换期 (年)
			立方公里	%		
液态水	地下水总量 (500 米以内)	9543000	56915	84.96	700.0	81.3
	土壤水	8260000	3355	5.01	3355.0	1
	湖泊水 (水库)	80645	821 (400)	1.23	51.0	16
	沼泽水	110000	50	0.07	10.0	5
	河流水	8510000	86	0.13	2600.0	0.033
气态水	大气水	9600000	163	0.24	6048.0	0.027
固态水	冰川	59400	5600	8.36	60	93
全 国		9600000	66990	100		

(表中河流水与大气水用全球平均值)

表 2 的统计说明以下几点:

- (1) 中国陆地水体 (地下水估计到 500 米深度) 与大气中的水分总储量估算是非常粗略的, 需要进

行细致的研究，但他们却为中国水体储蓄提供了一个大致的概念。可以作为一个参考。

- (2) 在各类水储蓄之中，地下水占了最大的数量，在水的总储量中要占 84% 以上。和世界各洲的平均情况相比较，中国地下水蓄量的比例是明显偏低的，但是，结合中国的具体地质地形（多山）条件分析，也可能是合理的。除地下水之外，冰川与土壤的储水量相对其它水量也是相当可观的。中国湖泊、河流、沼泽与大气中的储水量合起来大约为总储量的 2%。说明他们是非常珍稀的。
- (3) 中国的地下水与山地冰川的水储量虽然相当可观，但是这两部分水体的交换期或消补期很长（如表 2 所示），其中地下水的交换期在 80 年以上，其可利用性或有效性较低。不过我国冰川恰好分布在西部内陆的广大干旱地区，每年夏季从冰川而来的 600 亿立方米融水常常是这些干旱地区的重要水源。
- (4) 从水体的年循环量看，降水量、径流量与土壤水量是非常重要的。可为工程利用的主要是地表径流与浅层地下水。由表 3 可知，地表水资源约占我国可利用水资源总量（2670）立方公里的 74%，地下水约占 26%。

表 3 全国水资源储量估算表

水资源	地表水资源					地下水资源		总计
	地表径流	冰川融水	湖泊水	沼泽水	合计	年循环量	合计	
数量 (立方公里)	1849	60	51	10	1966	700	700	2670
所占百分比 (%)	69.3	2.10	1.92	0.38	73.7	26.3	26.3	100

3. 中国主要河流、水资源量及其时空分布特征

1) 中国的主要河流

在中国流域面积大于在 100 km² 和 1000 km² 以上的河流大约分别有 50000 多条和 1500 多条^[2]，其中长江和黄河是中国国内的两条大河，他们源远流长，河流长度分别为 6400 和 5400 多公里，流域面积分别为 180 万和 80 万 km²。受地形气候的影响，中国的河流在地区上分布很不均匀，绝大多数河流分布在东南部气候湿润多雨的夏季风区，西北内陆距海洋远，气候干燥少雨，河流稀少，有广大面积的内陆河流与无流区。中国主要河流特征见表 4。

表 4 中国主要江河

河名	河长 (km)	流域面积 (km ²)	河名	河长 (km)	流域面积 (km ²)
长江	6300	1808500	海河	1090	263631
黄河	5464	752443	淮河	1000	269683
黑龙江	3420	1620170	滦河	877	44100
松花江	2308	557180	鸭绿江	790	61889
珠江	2214	453690	额尔齐斯河	633	57290
雅鲁藏布江	2057	240480	伊犁河	601	61640
塔里木河	2046	194210	元江	565	39768
澜沧江	1826	167486	闽江	541	60992
怒江	1659	137818	钱塘江	428	42156
辽河	1390	228960	浊水溪	186	3155

2) 中国的地表与地下水资源量

中国地表与地下水资源总量仅次于巴西、俄罗斯、加拿大、美国和印度尼西亚，居世界第六位。水资源总量并不少，但因中国人口众多，人均水资源占有量偏少。根据上世纪末统计，我国人均水资源量为 2200m³，仅为世界人均水资源量平均值的 1/3 左右。联合国可持续发展委员会等 7 个有关组织 1997 年对世界 153 个国家和地区进行统计，我国人均水资源量排在世界第 121 位。

降水是水循环的中心，也是各种水资源赋存的总来源。中国降水总量约为 6.2 万亿 m³，折合降水深 648mm，低于全球陆地平均值。受气候和地形影响，降水的地区分布极不均匀，从东南沿海向西北内陆递减。中国的台湾省和西藏高原东南与云南西南的最大年平均降水量可达 5000~6000mm，而西北内陆塔里木盆地和柴达木盆地则不足 25mm。

由降水形成的地表水资源，包括河流、湖泊、冰川、沼泽等水体的水量。河川径流量基本上反映了降水量大小与分布。根据统计，中国全国降水量中约有 56% 的水量（组成为所谓的“绿水”），通过陆面蒸散发返回空中。根据陆面蒸散发量和地下水排泄量估算，全国土壤水总通量约 4 万多亿 m³（约占降水总量的 67%），其中约 16% 通过重力作用补给地下含水层，最后由河道排泄形成河川基流量，其余 3.5 万亿 m³ 消耗于土壤和植被的蒸散发；相应降水的 43% 左右形成径流，即形成“蓝水”的主要部分。中国全国河川径流总量大约为 27100 亿 m³，折合径流深 284mm；其中地下水排泄量 6780 亿 m³，约占 27%；冰川融水量大约为 600 亿 m³，约占 2%。中国河川径流量在中等干旱年（约 4 年一遇）约 25500 亿 m³，严重干旱年（约 20 年一遇）为 23600 亿 m³。多年平均由降水、地表水直接补给的地下水总量约 8288 亿 m³，其中山区 6762 亿 m³，平原区 1874 亿 m³，山区与平原区重复交换量约 348 亿 m³。扣除地表水和地下水相互转化的重复量，我国水资源总量大约为 28100 亿 m³。中国多年平均出（入）境和入海的水量如表 5。

表 5 入境、出境、入海水量统计^[2]

区域	当地径流 (亿 m ³)	入境径流 (亿 m ³)	合计 (亿 m ³)	出境径流 (亿 m ³)	入海径流 (亿 m ³)	消耗水量 (亿 m ³)	消耗占可 用水量(%)
外流河	25951	81	26032	7185	17148	1699	6.5
内陆河	1164	91	1255	135	入内陆湖 95	1025	81.6
全 国	27115	172	27287	7320		17243	2724
%	99.4	0.6	100	26.8	63.2	10.0	--

3) 中国水资源的分布区与植被生态类型

中国的降水量和年径流深受海陆分布、水汽来源、地形地貌等因素的影响，在地区上分布极不均匀，总趋势从东南沿海向西北内陆递减。按照年降水量和年径流深的量级，可将全国划分为 5 个地带。

(1) 年降水量大于 1600mm 为多雨—丰水带，年径流深超过 800mm。包括浙江、福建、台湾、广东的大部分，广西东部、云南西南部和西藏东南隅，以及江西、湖南、四川西部的山地。这一带降水量大，雨日多，为我国主要双季稻产区和热带、亚热带经济作物区。植被生态类型主要为亚热带长绿林及热带、亚热带季雨林等。

(2) 年降水量 800~1600mm 为湿润—多水带，年径流深 200~800mm。包括沂沭河下游和淮河两岸地区，秦岭以南汉江流域，长江中下游地区，云南、贵州、四川、广西的大部分以及长白山地区。这一带夏季高温多雨，农作物生长期较长，盛产水稻、小麦、油菜等，为我国主要农作区之一。

植被生态类型主要为混交林，以落叶林、耐旱的长绿林和竹类等组成。

- (3) 年降水量 400~800mm 为半湿润—过渡带，年径流深 50~200mm。包括黄淮海平原，东北三省、山西、陕西的大部分，甘肃和青海的东南部，新疆北部、西部的山地，四川西北部和西藏东部。该地带降水集中在夏秋季，变率大，容易遭受旱涝威胁，是我国主要旱作农业区之一。植被生态类型主要为夏绿林，也混有旱生的针叶林等，在降水少的地区，呈现森林草原景观。
- (4) 年降水量 200~400mm 为半干旱—少水带，年径流深 10~50mm。包括东北地区西部，内蒙古、宁夏、甘肃的大部分，青海、新疆的西北部和西藏部分地区。这一地带气候干燥，降水量偏少，农作物一般需要灌溉补充水量，大部分地区生态类型以生长草类为主，为我国主要牧区。中、高山有森林分布。
- (5) 年降水量小于 200mm 为干旱—干涸带，年径流深不足 10mm，有面积广大的无流区。包括内蒙古、宁夏、甘肃的荒漠和沙漠，青海的柴达木盆地，新疆的塔里木盆地和准噶尔盆地，西藏北部的羌塘地区。该地带降水稀少，属于没有灌溉就没有农业的地区。植被很少，仅有稀疏的小灌木，生态类型大部分是荒漠。

4) 水资源的年内与年际变化

受季风气候影响，中国降水量年内分配极不均匀，大部分地区年内夏季连续四个月降水量占全年水量的 60~80%。也就是说，中国水资源中大约有 2/3 左右是洪水径流量。我国降水量年际之间变化很大，南方地区最大年降水量一般是最小年降水量的 2~4 倍，北方地区为 3~8 倍，并且出现过连续丰水年或连续枯水年的情况。降水量和径流量的年际剧烈变化和年内高度集中，是造成水旱灾害频繁，农业生产不稳定和水资源供需矛盾十分尖锐的主要原因，也决定了中国江河治理和水资源开发利用的艰巨性和复杂性。

5) 气候变化对水资源的影响

近 20 多年来北方干旱缺水与南方洪涝灾害同时出现，形成了北旱南涝的局面。八十年代华北地区持续偏旱，京津地区、海滦河流域、山东半岛十年平均气温偏高 0.1~0.36°C，降水量偏少 10%~15%。由于降水偏少，气温偏高，蒸发加大和人类活动的影响，产流量明显减少。根据海委初步分析，1980~1989 年海滦河全流域平均产生地表径流仅 154 亿 m³，比 1956~1979 年平均径流量 288 亿 m³ 减少了 46.5%，约 134 亿 m³。上世纪九十年代，干旱区向西南方向延伸，黄河中上游地区（陕西、甘肃、宁夏三省、区），汉江流域，淮河上游，四川盆地 1990 年代平均气温偏高 0.3~0.8°C，降水量偏少约 5%~10%。黄河花园口以上同期平均产水量估计偏少约 20%。海滦河和淮河的年径流量也都明显偏少。以 1994~1999 年《水资源公报》资料为依据，6 年平均的年降水量、年径流量、水资源总量和入海水量均比 1956~1979 年的平均值明显偏少。黄淮海三流域降水量年平均减少 9.6%，径流量减少 23.8%，入海水量减少 56.8%，年径流量年平均减少了 402 亿 m³。西北内陆地区，八十年代降水量略有减少（2.5%），九十年代略有增加（8.9%）。由于高山地区冰川融水的多年调节作用，西北内陆河各河流出口口的多年平均流量变化基本持平。本世纪初新疆河流如阿克苏河径流量增加，而甘肃石羊河径流量略有减少。据有关研究，未来 50 年全球年平均气温预计将升高 0.7~4.0 度；若气温升高 1 度，地表蒸散量将可能提高，水资源量将相应减少。具体到我国的各大流域，则因区域水资源对气候变化的区域分异性的不同而不同。

6) 水土资源区域分布不平衡

中国水资源南多北少，相差悬殊，与人口、耕地和生产力的分布不相适应。根据上世纪末统计，将全国十个流域分区合并成南方、北方与西北内陆三个明显不同的类型区，进行水、土资源、生产力组合条件的比较。见表 6。

表 6 水资源、人口、耕地、人均水量、亩均水量统计表^[2]

分 区	占全国 (%)				人均水量 (m ³ /人)			亩均水量 (m ³ /亩)
	水资源	人口	耕地	GDP	1997	2010	2050	
东 北 诸 河	7.0	9.6	20.1	10.4	1646	1501	1287	660
海 滦 河	1.5	10.0	11.2	11.6	343	311	273	258
黄 河	2.7	8.6	12.8	6.7	707 517*	621 454*	526 385*	401 293*
淮河及山东诸河	3.3	16.1	15.1	14.1	487	440	383	437
以上北方小计	14.7	44.3	59.2	42.8	748 711*	676 634*	582 554*	471 427*
长 江	35.0	34.3	23.8	33.2	2289	2042	1748	2783
东南沿海诸河	7.0	5.6	2.5	8.1	2827	2613	2231	5344
珠江及华南诸河	17.1	11.9	7.2	13.5	3228	2813	2377	4501
西 南 诸 河	21.3	1.6	1.7	0.7	29427	25056	20726	23090
以上南方小计	80.4	53.5	35.2	55.5	3481	2952	2634	4317
内 陆 河 片	4.8	2.2	5.6	1.7	4876	4140	3331	1589
全 国	100	100	100	100	2220	2050	1760	1888

注：1、星号（*）表示计入输送泥沙的水量；2、中国的1亩等于667平方米。

- (1) 中国南方区域：中国水资源有 80.4%分布在长江流域及其以南地区，而该地区的人口占全国 53.6%，耕地占 35.2%，人均水资源量 3481m³，亩均水资源量 4317m³，属于人多、地少、经济发达，水资源相对丰富的地区。
- (2) 中国北方区域：长江流域以北地区，人口占全国 44.3%，耕地占 59.2%，水资源仅占 14.7%。人均水资源量 747m³，亩均 471m³，属于人多、地多、经济相对发达，水资源短缺的地区。黄淮海三流域尤为突出，三流域耕地占全国的 39.1%，人口占 34.7%，GDP 占 32.4%，而水资源仅占 7.7%。三流域人均水资源量 500m³，亩均少于 400m³，是我国水资源最为缺乏的地区。
- (3) 中国内陆河区域：内陆河区域土地面积 337 万 km²，约为全国的 35%，水资源总量大约为 1400 亿 m³，占全国的 5%左右。该地区耕地面积占全国的 5.6%，人口占 2.1%。虽然人均水资源量达到约 4876 m³，亩均约 1600m³，但干旱区的沙漠绿洲生态需要大量水分维系其脆弱的稳定性，使水资源进一步开发利用受到生态与环境需水的制约。

4. 水资源开发利用状况及其主要问题

1) 资源的开发利用

(1) 供水量的状况

据统计，2000 年前中国已建成蓄水工程 84000 多万座，总库容达 4500 多亿 m³，按规模分类，其中 397 座大型水库，总库容接近 3270 亿 m³；中型水库 2634 座，总库容 730 亿 m³；小型水库 81000 多座，总库容大约 590 亿 m³。跨流域调水工程主要有海河流域引黄工程，淮河流域引江工程及引黄工程，

如引黄济青、引黄入卫、苏北引江工程等跨流域调水工程等等。按南水北调实施以前的统计，引水工程约 110 万项，其中大型引水工程 160 项。提水工程 45 万处，其中大型工程 54 处。地下水供水的配套机电井 355 万眼。上世纪末全国有效灌溉面积已达 5230 万 hm^2 ，其中，机电井灌溉面积 1410 万 hm^2 。

上世纪末各种水源工程为用户提供水量达到 5600 多亿 m^3 。其中地表水供水量 4570 亿 m^3 ，地下水供水量 1000 多亿 m^3 ，其它水源供水量 26 亿 m^3 ，只占总供水量的 0.5%。海水直接利用较少，仅为 85 亿 m^3 。跨流域调水量大约 152 亿 m^3 ：其中海河流域引黄河水 56 亿 m^3 ，淮河流域分别从长江、黄河引水 60 亿 m^3 及 23 亿 m^3 ，山东半岛引黄河水 12 亿 m^3 。长江流域的湖北省引淮河水 0.35 亿 m^3 。在地表水源供水量中，蓄水工程占 34.5%，引水工程占 43.3%，提水工程占 22.2%。在地下水源供水量中，浅层地下水占 71.0%，深层地下水占 28.6%，微咸水占 0.4%。北方地下水供水占总供水量的 34%，为全国地下水可开采量的 88%。北方许多地区超过 100%，南方则以地表水供水为主，其占总供水量的 95% 以上，地下水开采很少。

（2）水资源开发利用程度

1993 年国际人口行动提出的“持续水-人口和可更新水的供给前景，该”报告统计认为：人均水资源量少于 1700 m^3 为用水紧张的国家；人均水资源量少于 1000 m^3 为缺水的国家；人均水资源量少于 500 m^3 为严重缺水国家。由于人口的增长，到 21 世纪中叶，中国人均水资源量将接近 1700 m^3 ，成为用水紧张的国家。水资源开发利用程度反映了流域水资源开发和利用程度（表 7）。流域水资源的开发利用量与多年平均水资源总量的比值是水资源开发利用程度，用来评定流域水资源开发和利用程度。根据世界各国的实践经验，当一个流域水资源开发利用程度超过 40% 时，会出现水资源胁迫。

表 7 中国外流河流域水资源开发利用程度

流域	水资源总量	总供水量	开发利用程度
松辽河	1928.5	619.7	32%
海河	421.1	377.8	90%
黄河	961.0	496.5	52%
淮河	690.0	571.5	83%
长江	9613.4	1798.6	19%
珠江	4708.1	835.8	18%
东南诸河	1927.6	288.4	15%
西南诸河	5853.1	87.7	1.5%
内陆河	1303.9	547.1	42%
全国	27460.3	5623.2	20%

2) 水资源的几个主要问题

虽然中国水资源开发利用取得了巨大的发展，为我国国民经济发展做出了很大的贡献，但也存在许多问题。中国水资源利用的经济效益很低，一万美元 GDP 所消耗的水，分别是美国和日本的 2.5 与 24 倍。1 立方米水的能源消耗水平方面，一美元 GDP 所消耗能源的比较，如果日本是 1，德国是 1.5，美国是 2.67，而中国则是 11.5。中国农业水资源利用效率低，农业的水利用效率比先进国家低一倍，目前每生产一公斤粮食大约要耗水 1000 公斤，其中灌溉输水渠的效率平均不到 40%，或者说灌溉输水渠的水量损失率达到了 60%，而以色列则小于 10%，美国为 22%，日本为 39%。说明中国一半以上的水都在灌溉渠系中损失掉了。因此，提高中国灌溉效率的潜力很大。

中国水资源利用面临的主要问题包括：水少，供需矛盾尖锐，水资源利用效率低；水脏，水源污染严重；中国有 3 亿多人口缺乏饮水安全；春旱夏涝；夏季洪涝灾害频繁；因与水文条件和水资源不合理开发利用有关，许多地区的环境与生态系统退化。主要问题表现为以下几个方面：

(1) 广大北方地区缺水问题严重。近几十年，经过大规模的水利工程建设，全国的供水已经达到 5600 亿 m^3 左右，但我国缺水形势从总体上未得到改善，尤其是黄、淮、海流域缺水形势仍十分严峻。从 80 年代以来，海滦河、黄河、淮河流域先后进行持续干旱枯水期，河川径流衰减十分明显。地表水源不足导致平原地区大量开采地下水，不少地区地下水水位大幅度下降，河流干涸，生态与环境恶化。九十年代以来，黄河断流加剧，1997 年断流时间长达 226 天，下游河道断流长度达到 700 多公里；淮河中游 1999 年也出现了历史上罕见的断流现象。

(2) 缺水的干旱半干旱地区水资源供需矛盾尖锐。在中国占国土面积 52% 的地区存在地下水超采严重，水资源短缺，人们开采的深层地下水都是上万年甚至于更长时间蓄积起来的水。1960 年以后，华北平原至今已累计超采水量逾 1000 亿立方米；中国 660 多个城市的三分之二一直存在着不同程度的缺水，缺水带来的工农业年损失巨大，以千亿计。城市、工业高速发展挤占生态环境和农业用水。造成这些地区的生态与环境恶化，并使农业缺水现象呈严峻的态势。

(3) 工农业用水一方面很紧张，另一方面浪费很严重。用水浪费和缺水现象并存。全国农业灌溉水的利用系数平均在 0.3~0.4，工业万元产值用水量是发达国家的 10~20 倍；工业用水的重复利用率平均为 30~40%，而发达国家为 75~85%，差距十分明显。全国多数城市自来水管网仅跑、冒、滴、漏的损失率平均达到 15~20%。节水、污水处理回用及雨水利用还没有很好推广。此外，由于长期以来工程失修，供水工程老化严重，严重影响了工程供水效益的发挥。

(4) 水资源污染严重，水环境污染问题涉及到人类的健康，“三湖、三河”污染态势在扩大。在黄河流域，除上游外，中下游污染严重，很多地方都是五类水。此外，黄河还有严重的泥沙问题，加之各种各样的污染物排进入到河道，黄河已不堪负重。华北地区海河流域白洋淀素称“华北的明珠”，目前污染也非常严重。

中国水环境污染情况，七大江河水系的水质监测断面中，只有大约 30% 的断面符合三类以上水质，70% 左右的水是四、五类甚至是劣五类水，水污染不断加剧，江河湖库的水质下降，据不完全统计，废污水总排放量经过集中处理达标排放的只占 24%，其余未经处理或尚未达标就排入江河或用于农田灌溉。在中国约 10 万公里的评价河长中，IV 类以上的污染河长占 47%。辽河、黄河、海河、淮河流域，污水与地表水的比例，已超过标准；全国湖泊约有 75% 以上水域的水质受到严重污染。全国 118 城市的饮用水调查数据显示：64% 的城市，其地下水含水层受到严重污染；33% 的城市，地下水受到轻度污染。重点水环境治理项目，包括淮河、海河、辽河、滇池、巢湖、太湖、渤海、三峡水库等工程进展缓慢，国家第十个五年建设计划期间计划兴建的污水处理厂目前只完成了 51%。

(5) 水资源开发利用程度过高，超过水资源的承载能力，引起生态与环境的恶化，尤其是西北内陆河流域为甚。由于灌溉农业不断扩大，内陆河流域绿洲农业耗水量过大，挤占生态用水，引起下游生态环境恶化，天然绿洲萎缩、终端湖泊消亡、土地荒漠化发展加剧。尤以塔里木河下游绿色走廊的萎缩，石羊河下游民勤盆地地下水超采、荒漠化发展最为突出；黄、淮、海流域由于过量取用地表水，造成“有河皆干，有水皆污”的景观，河道季节性断流，使河道下游的生态与环境恶化，并加剧了河口淤积现象，使河流的排泄洪水的能力下降，易成洪灾。

(6) 依法管水不力。1988 年《中华人民共和国水法》颁布后，中国的水管理体系初步建立。通过实施取水许可制度，调整水价，征收水资源费，贯彻水资源有偿使用，推动了节水工作的开展。但是，配套法规和监督、协调等机制尚未完全建立，有法不依、执法不严、各自为政的现象依然存在，

影响了水资源的合理利用。

3) 水资源确切评价问题的探讨

经济社会与资源环境结合的水资源确切评价涉及以下多个水量平衡要素：

P 降水, R 总径流, R_s 地表径流, R_g 地下径流, ET 总蒸发 (E+T), E 蒸发, T 蒸腾, W_h 渗蓄水。

采用多要素的水量平衡方程: P, R, R_s , R_g , ET, W_h 取代常用的年水量平衡方程: $P = R + ET$, 可以兼顾水资源与生态及环境定量分析。定义: $P - R_s = W_h$ 为流(区)域渗蓄水或土壤水通量; $R_g + ET = L$ 为流(区)域水量支出; 则闭合流域多年平均情况下有: $P - R_s = R_g + ET = W_h$ 。

比值 R_g / W_h 用于评价流域地下补给与河道基流; 比值 ET / W_h 可评价抑制蒸发的潜力 $ET = E + T$ 。用比值 E / W_h 的减小、 T / W_h 的提高, 表明农业产量增加; 用比值 R_s / W_h 的提高表明需要增强水土保持。用多要素的水量平衡的计算能较好的评价水的利用和估计人类活动的影响, 有利于地表水和地下水的联合计算和评价。

确定比值 R_g / W_h 的意义在于保持地下水的补给和河流的生态基流。控制和保持 R_g / W_h 的合理关系, 可以避免对地区地下水的盲目超采, 以维持河流稳定的基本流量, 即生态基流; 确定 E / W_h 的比值的意义在于调节土壤的湿润程度与节制无益的蒸发, 尤其是在年蒸发能力大于年降水 ($E_0 \gg P$) 的地区, 为有效地夺取潜水蒸发提供了科学的依据。在区域水资源的开发利用中, 合理地控制 R_g / W_h 与 E / W_h 两个比值实际上是保持自然的水量平衡结构, 以期维持水资源可再生性和生态与环境需水, 达到水资源永续利用和生态平衡的目的。为较好地评价人类活动(水资源开发利用)所带来的影响提供科学依据。

5. 水资源合理利用与环境保护的探讨

1) 广义的水资源与“绿水”及“蓝水”

通常所述的水资源是指流动与赋存在地表和地中的液体水(地表水和地下水), 这里我们称为“蓝水”^[3, 4], 他们是水利工程开发的对象, 因此, 也可称其为“工程水资源”。但从水循环的全过程和水量平衡的全要素来看, 这两种水(地表水和地下水)仅是降水转化而来的两部分。他们的数量有限, 在中国不到降水的一半。流域水循环全过程可以从降水开始经过植(作)物截留、下渗、产流与汇流等水文过程, 最终形成液态水, 包括河湖中的水、非饱和带水含土壤水以及饱和带的潜水与下层地下水。由上述可见, 由地表水与地下水组成的工程水资源应是降水的派生水。由于全球平均降水周期为 10 天, 降水不断的发生(积极可再生), 形成地表径流与地下水的补给, 成为对人类利用最为宝贵的可再生淡水资源。

因此, 按照地球水圈中的水分运动的全过程来分析, 我们可以把不断快速再生的降水作为流域天然水资源的总来源。作者在 1989 年发表的“华北平原农业水文与水资源”一书中曾称其为区域水资源总量^[5], 其中包含土壤水或有效降水。从水文循环过程追根溯源来看: 把地表水与地下水相加减去地表水与地下水转化的重复量作为水资源总量是不完全的, 属于狭义的水资源。

实际上, 对人类来说, 天然水的利用是多方面的。早在人类利用灌溉之前, 农业种植只是靠天吃饭的雨养农业。显然, 雨水的利用就意味着人类间接地利用了天然水资源, 如果仅把地表水与地下水当作唯一的水资源, 则局限了人类对水资源的全面而广泛的利用。其实, 广义的水资源理念就是要对能积极更新的降水及其所转化而来的地表水与地下水和其它各种水分加以开发利用, 包括人类对天然水的直接利用和间接利用。

所谓的“绿水”正是广义水资源内涵的一部分, 将绿水引入到水资源的范畴中意味着对水资源全面而更真实的理解。它对环境(生态)的保护具有极其深远的意义。根据“蓝水”和“绿水”概念并

进行计算，可得出中国全国及其主要流域的蓝、绿水的水量，从全国范围来看，“绿水”所占降水总量的比例高于“蓝水”，多年平均在60%以上，数量十分可观。图1是中国主要流域“绿水”与“蓝水”所占降水总量的比例分布^[6]。

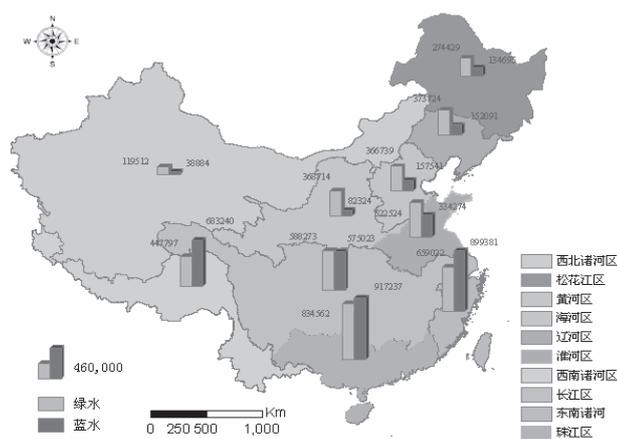


图1 中国各大流域每平方公里年平均“绿水-蓝水”水量比例分布

由图1可知，中国各流域每平方公里广义水资源量（“绿水-蓝水”）分布是极不均匀的。北方各流域，如黄河流域、海河流域、西北诸河流域等，绿水所占比重较大，绿水的利用与管理具有重要实际意义。

2) “绿水-蓝水”的利用问题

从广义水资源的角度看，自然环境（生态）与人类用水是一个统一而不可分的完整系统。人类的生活（城乡居民用水）、生产（工业与农业用水）与生态（包括环境与生态用水）构成为一个对水的“三生”共享水资源系统。“蓝水”如前述是指为水利工程开发利用的工程水资源，主要供给城乡生活与工农业生产用水。而“绿水”是蓝水以外的天然生态系统用水的水源，主要是土壤水，以气态的形式耗散（由于其以水汽形式转化，其功效不为人们直接视觉，而往往被忽视），而另有一部分生态系统如水生生物（动、植物），生存于水体之中或其周围，则直接与蓝水体戚相关。研究生态需水必须识别生态系统赖以生存的不同水源。作者在生态需水的研究中已把生态耗水水源划分为降水（转化为土壤水即绿水）直接供应与地表水及地下水，即蓝水的供应（干旱区的植被因降水少而常常利用地下潜水）。

绿水利用在人类生存及其环境中均有重要意义。我们已经熟知液态蓝水（地表与地下水）开发利用的工程技术，而对绿水利用与管理则相对知之甚少。

表8 人类对水资源的利用方式^[3]

水资源利用方式	绿水	蓝水
直接利用	经济生物量生长： 雨养农业，木材生产、纤维制造、 燃料用木材生产、牧场等	人类社会经济用水： 灌溉、工业用水、居民用水

间接利用	生态系统生物量生长： 湿地、草地、森林及其他陆生生境	社会系统服务： 水生生态系统所用淡水 其他生境
------	-------------------------------	-------------------------------

绿水对经济社会发展具有十分重要的意义，人类对绿水的利用包括经济生物量生长（雨养农业）等的直接利用和湿地、草地等陆生生境的间接利用。对绿水的管理也就是对绿水各种利用方式的管理，如通过减少植（作）物蒸散发、提高土壤水分利用效率来减少绿水的消耗等。另一方面，因为土地覆被利用变化又会影响蓝水的地表、地下径流的产生与形成，也就改变了绿水和蓝水的比例，这就需要对他们利用进行有效的综合管理，全面提高水资源利用水平，发挥对他们有效利用，如表 8。

3) “绿水、蓝水”与河道内的生态流量及环境流量

中国西北广大的干旱地区生态需水的研究业已表明：有大量的绿水与蓝水被各种不同的天然生态系统所利用。例如西北地区的年平均降水量达到 6900 亿 m³ 左右，而由其形成的蓝水（包括冰雪融水径流）只有 1800 亿 m³ 左右，有可能成为绿水的潜在数量可以达到 5100 亿 m³ 左右。显然，后者要占年降水量的 3/4，而前者只占 1/4。绿水潜在量与蓝水的比例为 2.8: 1.0。这里大量潜在绿水形成的原因主要是干旱内陆区的降水不足以产生蓝水，而被干旱的下垫面所截留利用，成为当地土壤水，被用在当地。

中国北方干旱地区生态退化问题多与水有关，城镇生活与工农业生产及生态用水的“三水”协调需要综合研究蓝水与绿水的合理利用。维系生态系统功能的生态需水量是保护生态与环境的重要问题，生态需水量按生态系统所处的位置，可以分为河道外生态需水与河道内生态需水。河道外生态用水主要是靠绿水，而河道内的生态需水、湿地生态系统需水则主要靠蓝水，同时也利用一部分绿水。后者显然与蓝水（工程水资源）的开发利用程度与效率有关。确定河道内（与河流相联系的生态系统）水的可利用量 (W_e) 有以下关系： $W_e = W[1 - \mu k]$ ，其中 W 为蓝水水资源量， μ 为河流水资源开发利用（取水）率， k 为水资源的消耗率，可以用取水后的回归水量来计算，如回归率为 r ，则 $k = 1 - r$ 。因此， $W_e = W[1 - \mu(1 - r)]$ 。如生态需水量 (W_{ea}) 已知，则比较 W_e 与 W_{ea} ，并使 $W_e = W_{ea}$ 来确定水资源开发利用的 μ 与 r 值，只有在 $W_e = W_{ea}$ 的条件下，生态系统与环境才不致退化。此外，要考虑蓝水在社会经济中的循环带来的污染问题，要把水量与水质结合起来计算生态与环境流量（图 2），并考虑应用循环经济中

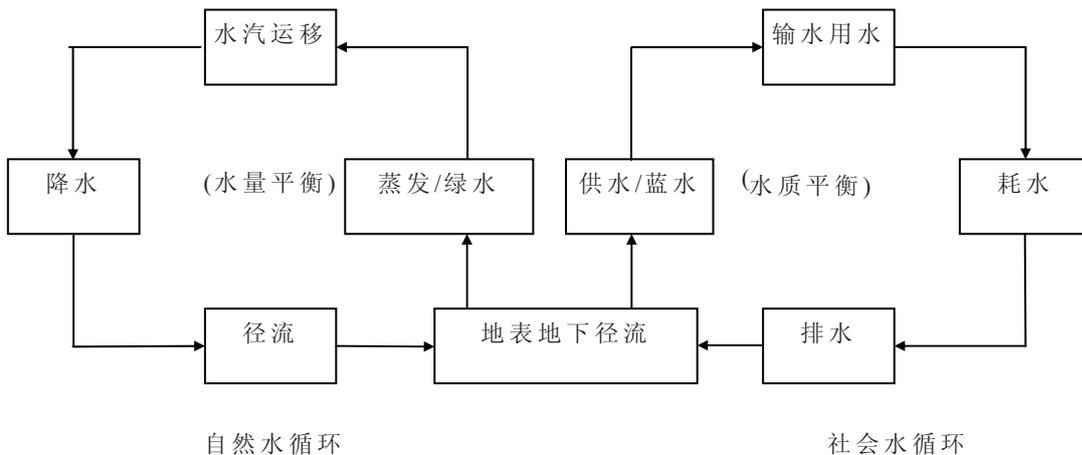


图 2 同时考虑水量与水质的生态流量计算概念框图

的“3R”（Reduce, Recycle and Reuse of water）于社会水系统的概念，如图 3 所示。

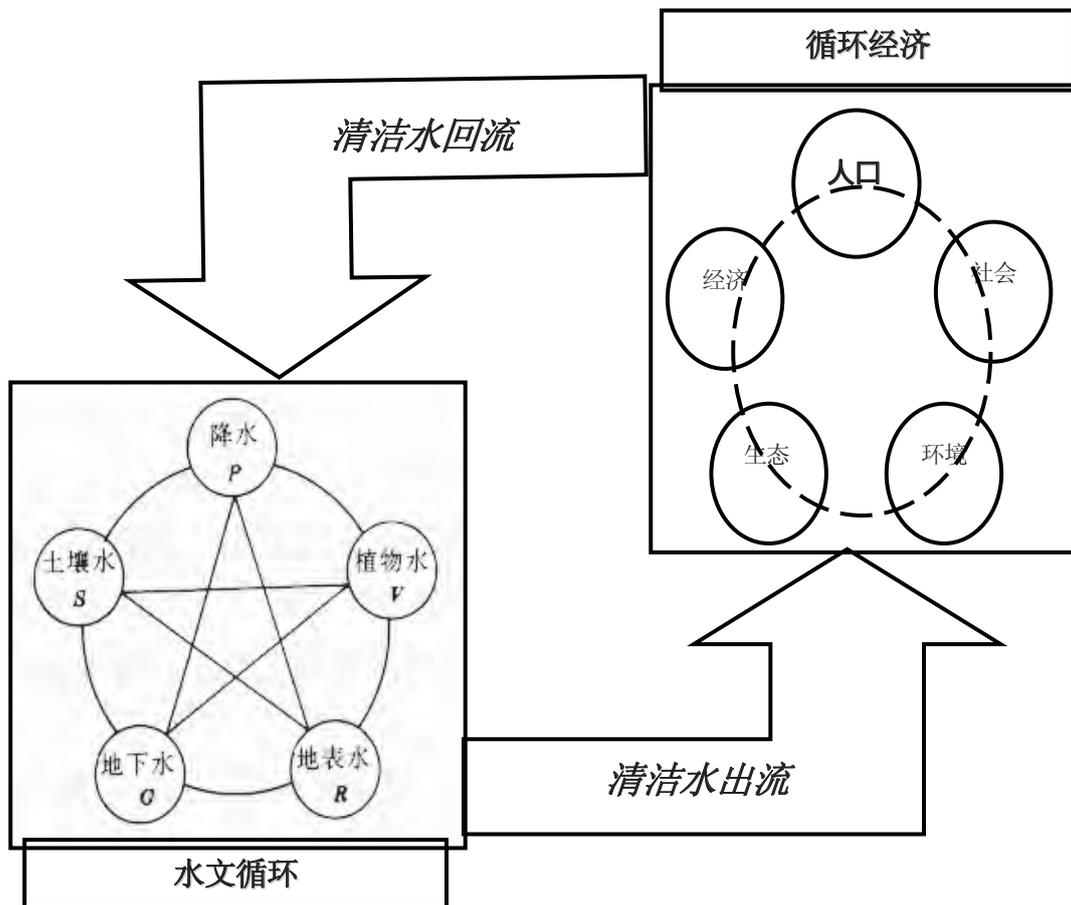


图3 自然-社会水系统与循环经济的“3R”示意^[7]

4) “绿水”、“蓝水”与农业生产

中国现有耕地面积约为 18.5 亿亩，灌溉面积约为 8.7 亿亩，因此，有近 10 亿亩（约一半以上）的耕地依赖绿水雨养。另外我国的草地约有 60 亿亩，很少灌溉，牧草也靠绿水生长。因此，绿水的利用与管理具有十分重要意义。从绿水可供粮食与畜产品生产直接利用的观点看，如何加强对土壤水分的管理也是一个值得研究的科学问题。采用绿水耕作与合理载牧措施，提高雨养农业与牧草地土壤水分利用效率或绿水利用效率是农业绿水管理的关键。

对于节水农业（灌溉节水）来说，绿水的作用主要体现在土壤水分的利用与调控上。我国对节水农业的定义有不同的观点^[8]，但是，从绿水的作用来看，作者认为：节水农业是以节水为中心的农业类型，在充分利用降水（绿水）的基础上，采用农业节水措施，合理利用开发与管理农业水资源，提高水利用效率和效益；同时，通过治水，改水，调整农业生态结构，改革耕作制度与种植制度，发展节水高产优质高效农业，最终实现可持续发展。农业节水措施包括极其丰富的内容，但节水农业（包括灌溉节水农业）的中心问题是提高绿水或由降水形成的土壤水和蓝水而来的灌溉水的综合利用效率。绿水利用的有效性无疑成为判断节水措施的效果与潜力的指标，包括所有绿水与蓝水的利用率与水分

利用效率。

由于水资源的珍稀性，对于耗水大户的灌溉农业来说，节约蓝水的意义是十分深远的。灌溉水不应是灌地，而是应灌作物。这种对灌溉的科学理念是从降水开始的，即以降水（绿水）为主体，把蓝水看作补充水，即所谓的“以地表水补降水的不足，以地下水补地表水的不足”，以满足作物增产的需水。显然，上面提到的蓝水（地表水与地下水）是围绕降水的利用来配置的，这就保证了蓝水灌溉作物的科学性。

6. 关于区域缺水的生态、社会与经济方面的定义

按以往的概念，一般缺水的定义是指供需之间的差额。西北地区人均水资源量很高，故有人认为西北地区不缺水，但当地难以接受这一观点，因为西北地区存在很多戈壁沙漠，说明非常干旱。

过去对缺水类型一般分三类：资源性缺水，工程性缺水，水质性缺水。也有提出管理性与浪费性缺水。由于概念不清而有一些争论。作者认为从生态、社会与经济三方面进行定义更为明确：

- 1) 生态气候学定义是基于生态气候的分析，可采用干燥指数来判断，当干燥指数大于1的地区（秦岭淮河以北就是这样的情况）应属于生态气候型（或生态型）的缺水，如西北干旱内陆区。
- 2) 社会学的缺水定义，基于社会发展与自然相协调的分析，可以划分社会性缺水，有4种：超承载性缺水，如东南沿海年降水大于1000地区；工程（设施）性缺水，如西南多雨地区；水质性缺水和管理（浪费）性缺水等四种不同类型缺水。
- 3) 经济学的缺水定义是基于经济发展的分析。边际经济效益（ db/dw ）不是负值，还有效益可图，也就是说水资源供应还满足不了经济进一步发展的需求。这种情况下的缺水，我们认为是经济性的缺水。

显然根据作者提出的以上三个缺水类型定义，不仅可以避免过去关于西北地区人口少、人均水资源拥有量大，是否应把西北干旱内陆区划为不缺水区域的争论问题，而且还有利于我们认清西北干旱内陆区耗水量大和保护生态与环境所需水量的意义。

7. 人水和谐与环境可持续发展的主要对策

1) 水资源合理利用的核心是节水

目前中国正值经济社会进一步高速发展时期，中国政府高瞻远瞩地提出了建立“资源节约型、环境友好型”社会的号召，水资源与水环境的工作必须加强节水与防治水污染的研究。面向中国全面奔小康的目标，高速发展必然会扩大包括水资源在内的一切资源的大规模开发利用，也会带来大量资源加工后的废弃物和污染，如何保障供水安全、粮食安全、环境安全、生态安全这四大安全，适应高速发展时期的需要，是我们面临的重大挑战。

水资源的合理利用是多方面的，但节水是其核心，既可以兼顾防污治污维护生态与环境，又体现以人为本的目的。节水的重要意义充分体现在以下几个方面：

- (1) 节水的内涵包括挖潜，为使区域水资源的潜力得以充分发挥，节水是必要的基础，例如工业万元产值取水量的降低，可节约工业用水成本，提高工业生产的效益；实现农业的高效用水，可以同时达到既节水又增产的目的，是“两高一优农业（高产、高效、优质）”的组成部分。
- (2) 节水是控制一个地区需水量盲目增长的有效途径。实际上，在实现水资源高效节水利用的条件下，一些按传统观念确定的缺水地区可以不缺水或少缺水。这是一个值得重新评价的问题。节水有助于实现需水的零增长。
- (3) 节水实施有利于生态与环境的维持，在灌溉区可避免浪费水引起的沼泽化、土壤次生盐渍化

与农药化肥引起的面源污染等不良生态与环境影响问题；在城市用水地区减少废弃水的二次污染，减少污水处理费用，可充分发挥水利工程的正效应，减少负效应，并可协调环境与发展关系，有助于可持续发展。

- (4) 市场经济的发展，水资源的获取赋予其一定的经济价值，而节水是水利经济的高效益所在，因此随着市场经济的全面实施，决定了节水的必要性和现实。在缺水的中国大力发展节水，是必由之路，是首要的选择。
- (5) 实行节水推广是社会行动，有利于用户参与水资源管理，可以增进管理人员与用户的关系，并能使水资源管理与用户的利益挂钩，提高用水户保护水资源的责任心，相应减少国家在水资源管理方面的负担。

2) 水循环的微观研究的节水结合应用

土壤-植物-大气连续 (SPAC) 与五水 (降水、地表水、土壤水、地下水与植物水) 转化以及水盐运动等等都属水循环的研究的理论问题。特别在农业水资源管理的应用上有重要应用价值。

本文作者在 1990 年代和 2002~2004 负责国家自然科学基金重大项目和河北省重大科技项目中发展了土壤植物大气系统的界面水分调控理论在农业节水上的应用，在从叶-气、土-气和根-土三个界面上分别采用节水高产品种、秸秆覆盖保墒与调亏灌溉技术实现农业节水。提出了成本低廉、效果显著、操作简便的多种农艺节水模式，取得了节水 100 毫米，亩增收 100 元，粮食超 1000 公斤的优良结果。利用 SPAC 理论的水分运动的界面调控实现节水，并采用 MODFLOW 模拟河北栾城的地下水位，得出了控制地下水位下降，缓解地下水危机的明显效果。因此，节水与水循环的理论结合非常重要，上面所述显示了水循环理论应用具有的意义与运用前景。

3) 开源以节流为先的原则

由于中国水资源的分布极不均匀，由多水地区 (流域) 向少水地区调水具有必要性，调水是一种主要的开源措施，而且具有重要的宏观战略意义。调水与节水都是用来解决水资源供需矛盾的手段，调水、节水与污水利用同等重要。对于调水必须分析调入区缺水的性质。根据经济与社会的近远期需求与水循环的理论，进行周密的区域自然与社会条件以及水资源供需平衡分析，以确定调水的合理规模。跨流域调水对于调入区来说，是一种最主要的开源，而开源又必须在节流的前提下进行，这是跨地区水资源调配的基本原则。只有实现了调入区的节流，充分挖掘调入区水资源潜力之后，实施调水才是最经济、最合理的。这样可以使调入区的调水量规模最小而效益最大。必须遵循中国政府提出的“三先三后 (先节水后调水，先治污后通水，先环保后用水)”指示，节水先行。这是调水开源与节水必须遵循的原则。

增加供水，发展生产必然产生更多的新的耗水，同时伴随着污水排放的增加。中国经济社会的快速发展，缺水与水污染并存必然成为一种发展的趋势，这是处在经济快速发展时期定会出现的两个问题。作者认为节水是一种最为适应的对策，因为节水有一箭双雕之功，节水可以缓解缺水，同时可以减少废污水的排放，既能节约水资源又能保护水环境。另外，从“三生” (生活、生产与生态) 用水共享实际情况来看，生产与生活的节水对生态系统维护 and 环境保护均有重要的功效。因此，进一步可视节水为“一箭多雕”。

“节水优先、治污为本、多渠道开源”是中国科学家提出的关于中国水资源战略的精辟概括。如果实现了节水与治污，必然会减少开源投入的规模，同时大大提高开源的效益。因此，对调水而言，节水与调水并不相悖，而是相辅相成的。作者认为，解决中国与水相关环保问题，必须树立节水与开

源并举的统一观点。

8. 结语

协调人与水的关系与建立人与自然相处的和谐关系,实现区域可持续发展是水资源管理基本目的。在流域水资源的开发利用中,跨境管理问题是影响河流开发治理的重要因素,这就需要在进行开发利用水资源时,要协调不同区域的经济社会与生态及环境,对流域进行全面规划,对流域水资源进行统一管理。水量与水质、地表水与地下水统一调控是不可分割的。中国目前水资源保护和水污染防治仍属于水量、水质分部门的分割管理模式,地表水与地下水与水资源分部门监测。因此在水资源管理的体制上,必须进一步改革。统一考虑水资源管理的整体性,如自净能力,水环境承载力;必须改革水资源的管理体制多年以来部门分割、地区分割的水资源管理体制,采取流域管理与区域管理相结合和“一龙管水,多龙治水”的模式,对江河上中下游、城市与乡村、水量与水质、地表水与地下水,供水与需水、用水与防治污染,实行统一规划和统一管理;建立城市供水、用水、排水、污水处理一体化的城市水务局管理体制;根据水资源现状以及流域各地区各城市社会经济发展规划,进一步明确水资源保护的战略目标,从流域整体出发,统筹兼顾、全面规划、综合论证,全面协调干流与支流、上游与下游、点源与非点源水污染、城市与乡镇及城市与乡村用水之间的关系。做好流域水资源保护规划。使水资源的水量与水质保护规划纳入区域和地方国民经济发展规划,以促进社会与自然资源和环境的协调发展。

水资源是社会的基础资源和战略资源。水资源合理开发利用研究横跨于自然技术科学与社会经济科学之间,因而也是一门巨大的系统科学与系统工程,需要多学科与跨学科的研究。所谓的节水优先和以节水为核心的水资源合理利用,实际是解决缺水问题的关键,而水资源合理利用的全面理解应是以水循环的原理为指导,发展面向资源水利、工程水利、环境水利与生态水利等综合集成的“现代水资源科学”的综合研究。

参考文献

- [1] 刘昌明. 中国水量平衡与水资源储量分析. 第三次中国水经学会水文专业委员会会议文集, 科学出版社, 北京, 1983.
- [2] 刘昌明, 陈志恺. 中国水资源现状评价和供需发展趋势分析. 科学出版社, 北京, 2001.
- [3] Malin Falkenmark. Green Water - Conceptualising Water Consumed By Terrestrial Ecosystems. Global Water News No. 2, August 2005, www.gwsp.org.
- [4] FAO. Land and water integration and river basin management. Proceeding of an informal workshop 31 Jan-2 Febr 1993. Land and Water Bulletin. Food and Agricultural Organization. Rome. 1995.
- [5] 刘昌明, 魏忠义等著. 1989. 华北平原农业水文与水资源. 北京: 科学出版社, 北京.
- [6] 刘昌明, 李云成. “绿水”与节水: 中国水资源内涵问题讨论, 科学对社会的影响. 科学出版社, 北京, 2006.
- [7] 刘昌明. 水资源若干问题的讨论. 郑州水论坛, 水利电力出版社, 北京, 2006.
- [8] 贾大林. 论农业高效用水模式. 水利部农村水利司主编《节水灌溉》, 中国农业出版社, 北京, 1998.