

# 石羊河流域天然植被适宜生态需水量估算

陈乐, 张勃, 任培贵

(西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃兰州 730070)

**摘要:** 基于遥感手段并运用 ArcGIS 9.3 软件统计获得石羊河流域 1987、2000 及 2010 年 3 期各类型天然植被面积数据, 采用阿维里扬诺夫估算方法对石羊河流域各县区天然植被的生态需水量进行了估算。结果表明, 石羊河流域 1987、2000 及 2010 年天然植被适宜生态需水量分别为  $2.43 \times 10^9$ 、 $2.34 \times 10^9$ 、 $2.06 \times 10^9$   $m^3$ , 其中各县区天然植被适宜生态需水量由多到少依次为: 肃南县 > 天祝县 > 永昌县 > 民勤县 > 古浪县 > 凉州区 > 金川区。石羊河流域林地、草地的生态需水量基本各占总需水量的 1/2, 但各县区林地、草地生态需水量的百分比差异明显, 流域天然植被的水分利用率介于 2.74~16.55 kg/( $hm^2 \cdot mm$ )。通过对石羊河流域 3 期天然植被适宜生态需水量的研究发现, 流域天然植被无论从总需水量还是各优势盖度的需水量上均呈现减少趋势, 因此确定天然植被的适宜生态需水量, 对区域水资源的合理配置和科学制定生态恢复方案具有重要的现实意义和借鉴作用。

**关键词:** 石羊河流域; 天然植被; 潜水蒸发; 植被适宜生态需水

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)01-0327-07

中图分类号: K903

## Estimation of Ecological Suitable Water Requirements for Natural Vegetation in Shiyang River Basin

CHEN Le, ZHANG Bo, REN Pei-gui

(College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

**Abstract:** The areal data for each type of natural vegetation in 1987, 2000 and 2010 in the Shiyang River Basin were obtained using remote sensing method with the aid of ArcGIS 9.3 software statistics. Accordingly, the ecological water requirements of natural vegetation in different counties and areas of the basin were estimated. By using Avi Lubyanka estimation method, it turned out that the suitable ecological water requirements for natural vegetation was 2.43, 2.34, 2.06 billion  $m^3$  in 1987, 2000 and 2010, respectively. The counties, in order of decreasing water requirement, were Sunan County, Tianzhu County, Yongchang County, Minqin County, Gulang County, Liangzhou area and Jinchuan area. The ecological water requirement for each of woodland and grassland in the basin basically took up half the total water demand. However, it is obvious that there was a sharply different percentage for the ecological water requirements of woodland and grassland in different areas, and the water using efficiencies of natural vegetation were between 2.74 and 16.55 kg/( $hm^2 \cdot mm$ ). Through the study of the ecological water requirements of nature vegetation in three different periods, it is found that the water requirement of nature vegetation showed a decreasing trend both in the total water requirement and the coverage degree of natural vegetation. So the determination of the suitable ecological water requirement for natural vegetation has a significant meaning to the rational allocation of water resources and the scientific schemes worked out for ecological restoration.

**Keywords:** Shiyang River Basin; natural vegetation; groundwater evaporation; suitable ecological water requirement for vegetation

收稿日期: 2013-05-21

修回日期: 2013-05-30

资助项目: 国家自然科学基金项目“水资源约束下的黑河流域土地利用/覆盖变化模拟研究”(40961038); 生态经济学省级重点学科项目(5001-021); 西北师范大学知识与科技创新工程项目(NWNU-KJCXGC-03-06)

作者简介: 陈乐(1988—), 男(汉族), 陕西省长武县人, 硕士研究生, 研究方向为区域环境与资源开发。E-mail: chenle2410@163.com。

通信作者: 张勃(1963—), 男(汉族), 甘肃省华池县人, 教授, 博士生导师, 主要从事区域环境与资源开发研究。E-mail: zhangbo@nwnu.edu.cn。

作为中国西部生态脆弱区最关键的生态因子,水不仅是干旱区生态系统构成、发展和稳定的基础,而且决定着干旱区绿洲化过程与荒漠化过程这两类极具对立与冲突性的生态环境演化过程<sup>[1]</sup>。在西北干旱地区,由于水资源的天然不足,加之工农业及家庭用水的增加,使得植被生态用水受到严重挤占,严重影响到植物群落的生长发育、演替更新的过程,进而导致天然植被退化、尾间湖泊消失等生态环境问题。石羊河流域是甘肃省河西走廊 3 大内陆河流域之一,属于干旱、半干旱地区,是中国内陆河流域中人口最密集、水资源开发利用程度最高、用水矛盾最突出、生态环境问题最严重的流域之一<sup>[2]</sup>。因此,在有限的水资源条件下,科学合理地确定区域在生态保护目标下的天然植被生态需水量,遏止天然植被生态系统进一步退化萎缩,是目前石羊河流域所面临的急须解决的关键问题。

生态需水研究是目前恢复生态学、水文学及水资源研究的热点领域<sup>[3]</sup>,该研究越来越受到众多学者的关注。针对生态需水的研究源于美国 20 世纪 40 年代,其目的是为了获取维持鱼类生存所需的河道基流,之后扩展到研究河岸带生态需水,直到现在开展的流域尺度、区域尺度上生态需水的研究<sup>[4-7]</sup>。国内对生态需水的研究起步较晚,主要是针对生态脆弱的西北干旱和半干旱地区,重点对植被生态需水概念和计算方法展开的定性分析、定量计算的研究。众多学者出于不同的研究目的对生态需水展开了卓有成效的研究,一些学者<sup>[8-10]</sup>基于不同的研究对象阐述了各自对生态需水概念的理解,另一些学者<sup>[11-13]</sup>对内陆干旱区的植被需水量进行了大量的估算研究,但由于对生态需水定义的不统一导致植被需水量界定标准存在异同。通过阅读大量文献并结合本文的研究目的,总结认为生态需水是指使生态系统达到某种生态保护目标,发挥期望的生态功能或维持某种生态系统平衡所客观需要的水资源量,其内涵包括维持生态系统结构和维持生态过程与生态服务功能两部分的需水。

本文基于潜水蒸发理论,结合遥感技术及 ArcGIS 9.3 软件统计获得石羊河流域 1987,2000 及 2010 年 3 期各类型天然植被面积数据,重点对适宜生态需水情景下的天然植被生态需水量进行了估算研究,以期得到石羊河流域天然植被最为合理的生态需水量,为区域水资源的合理配置、高效利用及生态安全提供科学依据。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

石羊河流域位于甘肃省河西走廊东部,东起乌鞘岭,西止大黄山,介于祁连山东段与巴丹吉林、腾格里沙漠南缘之间,地理坐标为  $36^{\circ}29'—39^{\circ}27'N$ ,  $101^{\circ}41'—104^{\circ}16'E$ ,包括武威市的古浪县、凉州区、民勤县及天祝县,金昌市的永昌县和金川区以及张掖市肃南县,共 3 地(市)7 个区县。石羊河干流全长约 300 km,流域面积  $4.16 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,从南向北大体分为 3 个地貌单元,南部祁连山地、中部走廊平原、北部阿拉善高原,高寒草甸、灌丛草甸、森林灌丛、绿洲植被及荒漠草原等为区内主要的植被类型。流域深居内陆腹地,具有干旱少雨,蒸发量大的气候特征。上游祁连山和中部走廊区年降水量分别为 300~600 和 150~300 mm,下游民勤地区极其干旱,年降水量小于 150 mm,全流域年蒸发量介于 1 200~2 600 mm。流域水系自东向西由大靖河、古浪河、黄羊河、杂木河、金塔河、西营河、东大河、西大河 8 条河流组成,河流补给主要来源为山区大气降水和地下水,多年平均出山径流量为  $1.66 \times 10^9 \text{ m}^3$ <sup>[2]</sup>。

### 1.2 植被生态需水研究机理

植被是生态系统中最基本的成分,是自然环境最直观、最准确的反映<sup>[14]</sup>,又是水土流失和土壤荒漠化的主要调控者,也是最容易受到破坏的部分。植被是退化生态系统恢复的关键所在,确定合理的植被生态需水量又是该研究的基础,因其正常的生长必然消耗一定的水量。中国西北干旱地区水资源短缺,植被退化严重,生态环境恶劣,对植被生态需水的研究便显得尤为重要。因此,近年来,干旱区植被的生态需水问题已成为植被生态恢复和重建研究领域的热点问题<sup>[15-16]</sup>。

植被生态需水是指在一定的时空尺度上和生态保护目标下,维持植被生态系统的稳定,使其发挥生态环境功能所需要的水资源量,具有上限值和下限值,超过这个阈值都会导致生态系统的退化和破坏。限制干旱区天然植被健康生长的主要因素有水分和土壤盐分<sup>[17]</sup>。干旱区的有效降水量不足以满足天然植被的正常生长所需,地下水是天然植被蒸腾和地表土壤蒸发的主要来源。植被的生长态势也受到潜水埋深的影响,当潜水埋深过浅时,因地表蒸发强烈,土壤表层盐分不断积累,使得土壤中盐分的浓度超过植物根细胞中细胞质浓度,植物生长形成所谓的“生理干旱”从而导致枯萎死亡;而潜水埋深过深时,植物根系层土壤从潜水层获得的水分补给就会显著减少,以

至于不能满足植物生长对水分的要求,致使植被衰败死亡,进而发生土壤荒漠化。

张丽等<sup>[18]</sup>通过对黑河流域下游天然植被生态需水量的研究认为,干旱区每种天然植被类型都有其适宜生长的潜水埋深变动范围,植被盖度与地下水埋深存在一定的关系。因而决定了天然植被需水量有最小生态需水、适宜生态需水和最大生态需水 3 种情景之分。当地下水分供应量低于天然植被的最小生态需水量或超出其最大生态需水量时,都将使天然植被生态系统受到破坏而退化,达不到应有的生态效用。只有当可供利用的水资源量达到适宜生态需水量时,生态系统才能健康良好地生长,发挥其最佳的生产潜力。

### 1.3 计算方法

目前研究植被生态系统需水量的计算方法较多,但各种计算方法的应用前提和侧重有所不同,归纳起来主要有以下几种:(1) 面积定额法(直接计算法)<sup>[19]</sup>,适用于基础条件较好,可通过实验容易获得蓄水定额的区域和植被类型。(2) 潜水蒸发法(间接计算法)<sup>[20]</sup>,适用于降水量少、植被生长主要依赖于地下水的干旱地区,可以用该方法估算干旱区植被的天然需水量。(3) 基于植物蒸散发量的计算法<sup>[21-22]</sup>,

即联合国粮农组织(FAO)提出的受破坏非完全覆盖的天然植被生态需水计算方法,该方法需要的参数较多,在基础资料薄弱的地区应用较为困难。(4) 水量平衡法<sup>[16]</sup>,比较适合于区域较大尺度的生态需水估算。(5) 基于生物量的生态需水计算法<sup>[23]</sup>,适合单纯靠降水支撑的地带性植被。(6) 基于遥感技术的植被生态需水量计算法<sup>[24]</sup>,适用于大区域、长时间尺度。

石羊河流域处于干旱缺水,天然植被和土壤的实际蒸散近似地等于潜水蒸发量,因此,选用最具代表性的潜水蒸发模型——阿维里扬诺夫公式进行植被生态需水量估算,其计算模型如下:

$$W = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m S_{ij} E_{ij} K_{ij} \quad (1)$$

$$E = a(1 - H/H_{max})^b \times E_{\phi 20} \quad (2)$$

式中:W——天然植被生态需水量;  $S_{ij}$ ,  $E_{ij}$ ——第  $i$  时段第  $j$  个研究区天然植被面积和蒸发强度;  $K_{ij}$ ——植被系数;  $a, b$ ——经验系数;  $H$ ——地下水埋深(m);  $H_{max}$ ——地下水蒸发极限埋深(m);  $E_{\phi 20}$ ——常规气象蒸发皿蒸发值,石羊河流域各县区的  $E_{\phi 20}$ (见表 1);根据文献<sup>[25-26]</sup>选取适合于石羊河流域天然植被潜水蒸发参数  $a$  为 0.762,  $b$  为 1.528;  $H_{max}$  取 5 m。

表 1 石羊河流域各县区常规气象蒸发皿蒸发值

mm

地区名称	凉州区	民勤县	天祝县	古浪县	金川区	永昌县	肃南县
蒸发值 $E_{\phi 20}$	1 964.6	2 643.9	1 545.2	1 812.1	2 094.2	2 000.6	1 828.4

植被系数  $K$  值的确定。植被系数  $K$  是指在相同的土壤和气候条件下,相同时期内植被生长条件下的潜水蒸发量  $E_g$  与裸地的潜水蒸发量  $E$  之比。植被系数主要受潜水埋深、水面蒸发强度和植物的长势、生育阶段等的影响。由于有植被生长条件下的潜水蒸发比裸地的潜水蒸发量要大,所以  $K > 1$ 。随着潜水埋深的增大,植被根系对潜水蒸发的影响越来越小。当潜水埋深趋于无穷大时,植被系数  $K$  将趋向于 1<sup>[27]</sup>。

干旱区内陆河流域植物恢复和生长的合理地下

水位的研究是确立生态需水量的基础,它涉及到水分胁迫下的植物适应机理等问题<sup>[1]</sup>。根据栗晓玲<sup>[26]</sup>及张长春等<sup>[28]</sup>的研究,石羊河流域各种天然植被适宜生长的潜水埋深变动范围:有林地 2~3 m,灌木林地 3~4 m,疏林地 3.5~4.5 m,高覆盖度草地 3~4.5 m,中覆盖度草地为 4~4.5 m。本文采用文献<sup>[27]</sup>所得的植被系数  $K$  与潜水埋深  $H$  之间的拟合公式:  $K = 1 + 2.0317e^{-0.5072H}$ ,计算得出石羊河流域各植被类型的植被系数  $K$ (如表 2 所示)。

表 2 石羊河流域天然植被的植被系数  $K$  取值

植被类型	有林地	灌木林地	疏林地	高盖度草地	中盖度草地	低盖度草地
植被系数 $K$	1.57	1.34	1.27	1.25	1.20	1.08

### 1.4 数据获取

基于石羊河流域 1987,2000 及 2010 年 3 期遥感影像人工解译的土地利用覆盖趋势,运用 ArcGIS 9.3 统计得出各类型天然植被的覆盖面积(表 3)。其中,天然植被分为林地与草地两种类型,林地指以生长乔

木、灌木为主的林业用地,可分为有林地、疏林地和灌木林地;草地是指以生长草本植物为主,覆盖度在 5% 以上的各类草地,包括以牧为主的灌丛草地和郁闭度在 10% 以下的疏林草地,按盖度分为高、中、低

覆盖度草地。有林地指郁闭度 $>30\%$ 的天然林地和人工林,以沙枣林为代表;灌木林地指郁闭度 $>40\%$ ,高度在 3 m 以下的矮林地和灌丛林地,以梭梭、柽柳为代表;疏林地指郁闭度  $10\% \sim 30\%$  的稀疏林地。高覆盖草地一般水分条件较好,草被生长茂密;中覆盖草地指覆盖度  $20\% \sim 50\%$  的天然草地,此类草地一般水分不足,草被较稀疏;低覆盖草地指覆盖度

$5\% \sim 20\%$  的天然草地,此类草地水分缺乏,草被稀疏,牧业利用条件差。分析可知,石羊河流域天然植被不论从总面积还是从植被盖度上都呈退化趋势,2000—2010 年天然植被退化趋势尤为显著,有林地、灌木林地及中盖度草地面积减少趋势明显,其中民勤县天然植被退化最为严重,而金川区的天然植被状况有小幅好转态势。

表 3 石羊河流域各县区天然植被面积

hm<sup>2</sup>

地区	年份	天然植被面积							
		有林地	灌木林地	疏林地	林地小计	高盖度草地	中盖度草地	低盖度草地	草地小计
民勤县	1987	2 836	9 755	10 094	22 685	7 360	61 781	153 895	223 036
	2000	2 286	8 146	10 349	20 781	6 359	51 970	161 171	219 500
	2010	1 161	4 506	8 465	14 132	2 626	19 899	95 593	118 118
凉州区	1987	3 734	4 505	3 616	11 855	9 802	63 464	52 405	125 671
	2000	3 398	4 021	3 908	11 327	6 820	61 377	55 797	123 994
	2010	3 011	3 490	4 352	10 853	1 820	44 277	47 171	93 268
古浪县	1987	2 123	2 790	5 496	10 409	13 635	59 713	161 741	235 089
	2000	1 813	2 427	5 666	9 906	10 254	55 506	157 156	222 916
	2010	1 456	1 617	5 013	8 086	2 932	50 393	144 371	197 696
天祝县	1987	53 206	38 388	25 086	116 680	39 924	95 817	9 437	145 178
	2000	51 893	35 748	27 676	115 317	41 355	93 157	10 593	145 105
	2010	43 463	28 301	29 313	101 077	55 817	109 239	16 765	181 821
金川区	1987	68	215	514	797	682	1 267	17 538	19 487
	2000	67	192	576	835	186	522	17 920	18 628
	2010	115	229	802	1 146	0	554	35 151	35 705
永昌县	1987	6 542	9 874	8 270	24 686	37 226	68 025	118 546	223 797
	2000	5 881	9 827	8 798	24 506	33 192	61 959	126 131	221 282
	2010	4 198	8 292	8 292	20 782	27 232	54 363	120 210	201 805
肃南县	1987	33 027	34 266	15 275	82 568	71 508	93 424	20 802	185 734
	2000	32 377	32 707	17 301	82 385	70 026	91 701	23 527	185 254
	2010	29 139	28 372	19 170	76 681	75 172	109 058	41 791	226 021
合计	1987	101 536	99 793	68 351	269 680	180 137	443 491	534 364	1 157 992
	2000	97 715	93 068	74 274	265 057	168 192	416 192	552 295	1 136 679
	2010	82 543	74 807	75 407	232 757	165 599	387 783	501 052	1 054 434

## 2 结果与分析

### 2.1 天然植被生态需水量估算

由于每种植被类型都有其适宜生长的潜水埋深变动范围,由式(2)可知,蒸发强度  $E$  随着潜水埋深  $H$  的增大而减弱。本文基于遥感解译所获得的石羊河流域各类型天然植被 3 期的面积数据,并利用潜水蒸发公式(1)分别在各植被类型的最大埋深、平均埋深及最浅埋深 3 种情景下,计算得出 1987、2000 及 2010 年石羊河流域各县区天然植被的最小生态需水量  $W_{\min}$ 、适宜生态需水量  $W_{\text{opti}}$  和最大生态需水量

$W_{\max}$ (表 4)。由于石羊河流域天然植被面积萎缩、盖度退化的因素,除金川区生态需水量呈增加趋势外,其他各县区生态需水量均有减少趋势。石羊河流域 1987、2000 及 2010 年天然植被总生态需水量分别介于  $1.30 \times 10^9 \sim 3.80 \times 10^9$ ,  $1.26 \times 10^9 \sim 3.66 \times 10^9$ ,  $1.09 \times 10^9 \sim 3.25 \times 10^9$  m<sup>3</sup>。其中,天祝和肃南两县天然植被生态需水量几乎占到全流域总生态需水量的 57% 左右,这主要是由于两县天然植被面积较大及植被盖度高所造成的,而金川区因天然植被面积小、盖度低,致使天然植被生态需水量仅占全流域的 0.9%。

表 4 石羊河流域各县区生态需水量估算

10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>

年份	生态需水 状况	天然植被生态需水量							合计
		民勤县	凉州区	古浪县	天祝县	金川区	永昌县	肃南县	
1987	最小	18 744	9 295	11 278	38 481	920	16 971	34 693	130 382
	适宜	34 906	17 572	21 814	65 752	1 773	34 942	66 243	243 002
	最大	55 682	28 160	35 323	97 445	2 736	57 114	103 163	379 623
2000	最小	17 508	8 865	10 520	37 673	860	16 333	34 215	125 974
	适宜	32 618	16 470	20 078	64 804	1 596	33 367	65 378	234 311
	最大	51 512	26 289	32 412	96 526	2 519	54 437	102 018	365 713
2010	最小	9 580	7 050	9 058	34 304	1 568	13 990	33 709	109 259
	适宜	17 909	12 601	16 518	61 934	2 833	28 632	65 861	206 288
	最大	28 794	19 819	26 317	94 917	4 414	46 864	104 268	325 393

## 2.2 天然植被适宜生态需水量估算

由植被生态需水机理可知,当植被获得地下水补给量过多或者过少时,均不利于植被的健康生长,只有地下水补给达到植被生长所需的适宜生态需水量时,植被才能发挥其最佳的生态效益。当潜埋深处于变动范围的平均水位时,由式(1)计算得到石羊河流域各县区 6 种植被类型的适宜生态需水量(表 5)。其中石羊河流域 1987,2000 及 2010 年天然植被适宜生态需水量分别为  $2.43 \times 10^9$ ,  $2.34 \times 10^9$ ,  $2.06 \times 10^9$  m<sup>3</sup>,各植被类型生态需水量排序依次为有林地 > 中

盖度草地 > 高盖度草地 > 低盖度草地 > 灌木林地 > 疏林地。通过 3 期天然植被需水量对比可知,林地、草地适宜生态需水量都呈持续减少趋势,其中有林地、灌木林地和中盖度草地生态需水量减少趋势显著。在适宜生态需水情境下,石羊河流域林地、草地的生态需水量基本各占总需水量的 1/2,但各县区的林地、草地生态需水量百分比差异明显,其中金川区、古浪县林地、草地生态需水量比明显低于全流域,而天祝县的林地需水量占明显优势,其他各县区的林地、草地生态需水量比基本与全流域持平。

表 5 石羊河流域天然植被适宜生态需水量

10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>

地区	年份	天然植被适宜生态需水量							草地小计
		有林地	灌木林地	疏林地	林地小计	高盖度草地	中盖度草地	低盖度草地	
民勤县	1987	3 178	4 493	3 387	11 058	2 433	8 233	13 183	23 849
	2000	2 562	3 752	3 470	9 784	2 102	6 925	13 806	22 833
	2010	1 301	2 075	2 824	6 200	868	2 652	8 189	11 709
凉州区	1987	3 110	1 542	894	5 546	2 407	6 284	3 336	12 027
	2000	2 830	1 376	960	5 166	1 675	6 077	3 552	11 304
	2010	2 507	1 194	1 064	4 765	447	4 384	3 003	7 834
古浪县	1987	1 631	881	1 264	3 776	3 089	5 454	9 496	18 039
	2000	1 393	766	1 300	3 459	2 323	5 069	9 227	16 619
	2010	1 118	511	1 147	2 776	664	4 602	8 476	13 742
天祝县	1987	34 850	10 333	4 923	50 106	7 711	7 462	473	15 646
	2000	33 990	9 623	5 419	49 032	7 988	7 255	530	15 773
	2010	28 469	7 618	5 721	41 808	10 781	8 507	839	20 127
金川区	1987	60	78	131	269	179	134	1 190	1 503
	2000	59	70	147	276	49	55	1 216	1 320
	2010	102	84	203	389	0	59	2 385	2 444
永昌县	1987	5 548	3 441	2 099	11 088	9 309	6 859	7 684	23 852
	2000	4 988	3 425	2 231	10 644	8 301	6 247	8 176	22 724
	2010	3 561	2 890	2 098	8 549	6 810	5 481	7 792	20 083
肃南县	1987	25 598	10 914	3 547	40 059	16 343	8 609	1 232	26 184
	2000	25 094	10 417	4 017	39 528	16 005	8 450	1 394	25 849
	2010	22 584	9 037	4 451	36 072	17 181	10 133	2 476	29 790
合计	1987	73 975	31 682	16 245	121 902	41 471	43 035	36 594	121 100
	2000	70 916	29 429	17 544	117 889	38 443	40 078	37 901	116 422
	2010	59 642	23 409	17 508	100 559	36 751	35 818	33 160	105 729

对于水资源严重短缺的石羊河流域而言,定量计算出单位面积天然植被的生态需水量,对石羊河流域水资源的合理配置、高效利用具有现实意义。本文在适宜生态需水情景下,计算得出各县区单位面积林地、草地的生态需水量(表 6)。由表 6 分析可得,由于天然植被盖度的严重退化,除金川区林地外,各县区

的天然植被单位面积的生态需水量均呈减少趋势。其中,民勤县的林地单位面积需水量偏高,而肃南县林地、草地单位面积需水量均明显偏高,而古浪县、金川区的林地、草地单位面积生态需水量明显偏少,这种差异的存在可能与各县区天然植被各类型组成成分及各县区常规气象蒸发皿蒸发值  $E_{\Phi_{20}}$  不同有关。

表 6 石羊河流域各县区天然植被单位面积需水量

 $m^3/hm^2$ 

年份	天然植被单位面积需水量													
	民勤县		凉州区		古浪县		天祝县		金川区		永昌县		肃南县	
	林地	草地	林地	草地	林地	草地	林地	草地	林地	草地	林地	草地	林地	草地
1987	4 874	1 069	4 678	957	3 627	767	4 294	1 078	3 386	771	4 492	1 077	4 852	1 410
2000	4 708	1 041	4 561	912	3 492	746	4 252	1 087	3 302	709	4 343	1 027	4 798	1 416
2010	4 541	991	4 392	846	3 432	695	4 136	1 107	3 388	684	4 072	995	4 704	1 318

### 2.3 水分利用效率

对于中国西北部这样重度缺水的地区而言,不仅要研究保证生态系统健康、稳定发展所需要的适宜生态需水量,也应从生态和经济效益方面计算它的水分利用效率,即天然植被在单位水资源条件下生产的生物量干重。其中,生物生产量的确定是根据国家“八五”科技攻关项目“草地生产力的区域分异与地面监测研究”中有关各类型草地地上生物量的统计结果,高盖度草地生物量干重定额取  $243.6 g/m^2$ ,中盖度草地  $128.9 g/m^2$ ,低盖度草地  $71.3 g/m^2$ ,有林地和

灌木林地  $306.5 g/m^2$ <sup>[24]</sup>。本文中疏林地的生物量干重以有林地和灌木林地的 60% 确定得到,疏林地  $183.9 g/m^2$ 。石羊河流域各县区天然植被在适宜生态需水量情境下的水分利用效率如表 7 所示。石羊河流域天然植被的水分利用率介于  $2.74 \sim 16.55 kg/(hm^2 \cdot mm)$ ,与黄土高原植被的水分利用效率  $1.05 \sim 10.05 kg/(hm^2 \cdot mm)$  相比存在 1.65 倍左右的偏高<sup>[29]</sup>,主要原因可能是石羊河流域深居内陆,干旱少雨,植被生长所需水分主要依靠潜水蒸发,因裸地蒸发而损失的水量较少,所以水分利用效率偏高。

表 7 石羊河流域各县区天然植被水分利用效率

 $g/m^3$ 

地区	天然植被水分利用效率					
	有林地	灌木林地	疏林地	高盖度草地	中盖度草地	低盖度草地
民勤县	274	666	548	737	967	832
凉州区	368	896	737	982	1 302	1 120
古浪县	399	971	799	1 075	1 411	1 214
天祝县	468	1 139	937	1 261	1 655	1 424
金川区	345	840	691	—	1 221	1 051
永昌县	361	880	724	974	1 278	1 100
肃南县	396	962	792	1 066	1 387	1 204
全流域	424	980	789	1 098	1 396	1 077

## 3 结论

(1) 对于西北干旱区天然植被而言,进行适宜生态需水量估算研究具有现实意义。本文在前人研究的基础上,基于阿维里扬诺夫公式重点对石羊河流域天然植被的适宜生态需水量进行了估算研究,得出 1987,2000 及 2010 年流域天然植被适宜生态需水量分别为  $2.43 \times 10^9$ ,  $2.34 \times 10^9$ ,  $2.06 \times 10^9 m^3$ 。各县区天然植被适宜生态需水量由多到少依次为肃南县 > 天祝县 > 永昌县 > 民勤县 > 古浪县 > 凉州区 > 金

川区。对 3 期天然植被适宜生态需水量进行对比发现,无论是全流域还是各县区的生态需水量都呈减少趋势,尤其在 2000—2010 年天然植被生态需水量减少趋势明显,这与城市化加剧对西北生态脆弱区天然植被的破坏不无关系。

(2) 在适宜生态需水情境下,天祝和肃南两县天然植被生态需水量占到全流域总生态需水量的 57% 左右,而金川区的天然植被生态需水量仅占到全流域需水量的 0.9%,这主要与各县区天然植被的面积相差很大有关。石羊河流域林地、草地的生态需水

量基本各占总需水量的 1/2,但各县区的林地、草地生态需水量百分比差异明显,这种差异的存在与各县区天然植被类型组成成分不同有关。由于石羊河流域各县区天然植被盖度的严重退化使得单位面积需水量呈减少趋势,其中,民勤与肃南县的天然植被单位面积需水量明显较高,而古浪县、金川区的林地、草地单位面积需水量则明显偏低,这可能与各县区的天然植被类型组成成分及常规气象蒸发皿蒸发值  $E_{\phi 20}$  不同有关。

(3) 计算得到石羊河流域天然植被在适宜生态需水量情境下的水分利用率介于 2.74 ~ 16.55 kg/(hm<sup>2</sup> · mm),与黄土高原植被的水分利用效率 1.05 ~ 10.05 kg/(hm<sup>2</sup> · mm) 相比存在 1.65 倍左右的偏高,主要原因可能是石羊河流域大气降水稀少,天然植被生长所需水分主要依靠潜水蒸发,因裸地蒸发而损失的水量较少。

(4) 确定合理的天然植被适宜生态需水量是干旱区退化植被恢复的关键所在,但天然植被生长需水具有时间差异性,本文由于数据有限而未对石羊河流域天然植被年内各个月份的适宜生态需水量进行研究,这还有待于今后进一步深入研究。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 陈亚宁,郝兴明,李卫红,等. 干旱区内陆河流域的生态安全与生态需水量研究:兼谈塔里木河生态需水量问题[J]. 地球科学进展,2008,23(7):732-738.
- [2] 冯起,李宗礼,高前兆,等. 石羊河流域民勤绿洲生态需水与生态建设[J]. 地球科学进展,2012,27(7):806-814.
- [3] 何永涛,闵庆文,李文华. 植被生态需水研究进展及展望[J]. 资源科学,2005,27(4):8-13.
- [4] 严登华,何岩,王浩,等. 生态水文过程对水环境影响研究述评[J]. 水科学进展,2005,16(5):747-752.
- [5] Bovee K D. The incremental method of assessing habitat potential for coolwater species, with management implication[J]. American Fisheries Society Special Publication, 1978,11(3):340-346.
- [6] Gallagher S P, Gard M F. Relationship between Chinook salmon(*Oncorhynchus tshawytscha*) redd densities and PHABSIM-predicted habitat in the Merced and Lower American rivers, California[J]. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 1999,56(9):570-577.
- [7] Sheail J. Constraints on water-resources development in England and Wales: Concept and management of compensation flows[J]. J. Environ. Manager, 1984,19(5):351-361.
- [8] 王芳,梁瑞驹,杨小柳,等. 中国西北地区生态需水研究(I):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.
- [9] 夏军,郑东燕,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(2):12-17.
- [10] 杨志峰,刘静玲,孙涛,等. 流域生态需水规律[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [11] 王根绪,程国栋. 干旱区流域生态需水量及其估算:以黑河流域为例[J]. 中国沙漠,2002,22(2):129-134.
- [12] 张凯,韩永翔,司建华,等. 民勤绿洲生态需水与生态恢复对策[J]. 生态学杂志,2006,25(7):813-817.
- [13] 郭巧玲,杨云松,陈志辉,等. 额济纳绿洲植被生态需水及其估算[J]. 水资源与水工程学报,2010,21(3):80-84.
- [14] 郑冬燕,夏军,黄友波,等. 生态需水量估算问题的初步探讨[J]. 水电能源科学,2002,20(3):3-6.
- [15] 郝博,粟晓玲,马孝义,等. 干旱区植被生态需水的研究进展[J]. 水资源与水工程学报,2009,20(4):1-5.
- [16] 胡广录,赵文智,谢国勋. 干旱区植被生态需水理论研究进展[J]. 地球科学进展,2008,23(2):193-200.
- [17] 张丽,董增川,赵斌. 干旱区天然植被生态需水量计算方法[J]. 水科学进展,2003,14(6):745-748.
- [18] 张丽,董增川. 黑河流域下游天然植被生态需水及其预测研究[J]. 水利规划与设计,2005(2):44-47.
- [19] 韩英,饶碧玉. 植被生态需水量计算方法综述[J]. 水利科技与经济,2006,12(9):605-611.
- [20] 司建华,龚家栋,张勃. 干旱地区生态需水量的初步估算:以张掖地区为例[J]. 干旱区资源与环境,2004,18(1):49-53.
- [21] 陈丽华,王礼先. 北京市生态用水分类及森林植被生态用水定额的确定[J]. 水土保持研究,2001,8(4):161-164.
- [22] 粟晓玲,康绍忠. 生态需水的概念及其计算方法[J]. 水科学进展,2003,14(6):740-744.
- [23] 卞戈亚,周明耀,朱春龙. 生态需水量计算方法研究现状及展望[J]. 水资源保护,2003,6:740-744.
- [24] 王芳,王浩,陈敏建,等. 中国西北地区生态需水研究(II):基于遥感和地理信息系统技术的区域生态需水计算及分析[J]. 自然资源学报,2002,17(2):129-137.
- [25] 张奎俊. 石羊河流域下游民勤绿洲生态需水与措施研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2008.
- [26] 粟晓玲. 石羊河流域面向生态的水资源合理配置理论与模型研究[D]. 陕西 杨凌,西北农林科技大学,2007.
- [27] 胡顺军,田长彦,宋郁东,等. 裸地与柽柳生长条件下潜水蒸发计算模型[J]. 科学通报,2006,50(S):36-41.
- [28] 张长春,邵景力,李慈君,等. 华北平原地下水生态环境水位研究[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2003,33(3):323-330.
- [29] 吴钦孝,杨文治. 黄土高原植被建设与持续发展[M]. 北京:科学出版社,1998.