干旱区绿洲—荒漠化演变中的水足迹表征研究
——以新疆天山北坡为例

郭鹏程[1,2,3,4]，包安明[1,3]，易秋香[1]，王兴娟[1,2,3]，王 强[1,2,3]，白泽龙[1,2,3]

（1. 中国科学院 新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐 830011；2. 中国科学院 研究生院，北京 100049；
3. 荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；4. 海南省环境地质勘察院，海南 三亚 520000）

摘 要：以新疆天山北坡为研究区，首先利用改进后的方法计算了研究区的水足迹，然后在水足迹时空变化和荒漠化格局演变分析的基础上，建立天山北坡荒漠化与水足迹之间的关系，并从水足迹的角度对天山北坡绿洲荒漠化的过程机制进行了分析。结果表明：(1) 1960—2007 年，天山北坡水足迹呈现较为明显的上升趋势，同时，水足迹结构发生了明显的变化。(2) 天山北坡各市县当地生产水足迹的空间差异明显。(3) 研究区荒漠面积与水足迹之间存在显著的负相关性。(4) 调整地区生产结构（特别是农业）和改善区域居民的消费模式都有利于减轻干旱区水资源压力，对干旱区荒漠化的预警和防治具有重要的战略启示。

关键词：干旱区；绿洲；荒漠化；水足迹；土地利用

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2012)01-0171-06 **中图分类号**：X87

Water Footprint Characteristics in Evolution of Oasis and Desertification in an Arid Area
—A Case Study of the Northern Slope of Tianshan Mountains, Xinjiang Wei Autonoumos

GUO Peng-cheng[1,2,3,4], BAO An-ming[1,3], YI Qiu-xiang[1],
WANG Xing-juan[1,2,3], WANG Qiang[1,2,3], BAI Ze-long[1,2,3]

(1. *Xinjang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang* 830011, *China*; 2. *Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*; 3. *State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Urumqi, Xinjiang* 830011, *China*; 4. *Hainan Environment and Geology Exploration Institute, Sanya, Hainan* 572000, *China*)

Abstract: By taking the northern slope of Tianshan Mountains as the research object, water footprint in the area is calculated by using an improved method. Then the relationship between desertification and water footprint is established based on the analyses of the spatiotemporal variation of water footprint and the desertification patterns. Moreover, the processes and mechanisms of oasis and desertification on the northern slope of Tianshan Mountains are analyzed from the water footprint perspective. Results showed that (1) from 1960 to 2007, water footprint in the area tended to increase obviously and meanwhile, water footprint structure changed significantly; (2) the productive water footprint had obvious spatial variation for the cities and counties in the area; (3) there was a significantly negative correlation between the deserted area and water footprint on the northern slope of Tianshan Mountains; (4) the adjustments of regional production structure (especially agriculture) and the improvement of the regional people's consumption patterns are favorable to reduce the pressures on water resources in arid areas, which have an important strategic implication for the early warning and prevention of desertification in arid areas.

Keywords: arid area; oasis; desertification; water footprint; land use

收稿日期：2011-04-09 **修回日期**：2011-06-03

资助项目：国家科技支撑计划“省级主体功能区技术规范与关键技术应用示范”(2008BAH31B06)；国家 973 项目“干旱区绿洲化、荒漠化特征及其时空格局”(2009CB421301)

作者简介：郭鹏程(1984—)，男(汉族)，湖南省郴州市人，硕士研究生，主要从事资源环境遥感与地理信息系统应用研究。E-mail：guopc08@sina.com。

通信作者：包安明(1967—)，男(汉族)，甘肃省平凉市人，研究员，主要从事遥感与地理信息系统应用研究。E-mail：baoam@ms.xjb.ac.cn。

绿洲化与荒漠化是干旱区陆表过程的两个主导过程，而人类活动与气候变化对绿洲化与荒漠化过程的影响，已成为各国政府、科学家普遍关注的全球性问题[1]。

前人研究表明人类对水资源的不合理利用以及由此导致的绿洲水环境条件改变是干旱区绿洲荒漠化的主要原因[2-4]，而水足迹能真实地反映人类对水资源的占用情况[5]，并且其数据来源相对容易获取，主要为气象数据和社会经济统计资料。因此，在干旱区水资源统计资料和遥感影像缺失的情况下，用水足迹来表征荒漠化是一个很好的选择。

新疆天山北坡地处亚欧大陆腹地，属温带半干旱、干旱气候，具有干旱少雨，蒸发强烈等气候特征，是我国典型的干旱地区。区域内具有明显的绿洲、荒漠景观，是典型的干旱区绿洲、荒漠生态环境交错带[2-3]。天山北坡经济带是新疆科技、经济和社会发展最为发达的区域，特别是近年来发展尤为快速，2009 年总人口达到 501.04 万人，约占全疆人口的 23.2%；生产总值为 2 265.01 亿元，占全疆生产总值的 53%[6-7]。而在社会经济快速发展的同时，人类对自然资源，特别是水资源的利用程度大大加强，甚至出现不合理利用的情况，对当地生态环境产生了较大的影响。

本文以新疆天山北坡为研究区，首先对天山北坡及其各市县 1960—2007 年近 50 a 的水足迹进行了计算与分析。然后在土地利用数据的基础上利用 GIS 和 RS 技术提取了同时期天山北坡的荒漠面积，并分析其时空演变格局。在此基础上建立水足迹与绿洲荒漠化之间的关系，并进一步探讨地区的生产结构和消费方式（人类活动）是如何通过影响水足迹（水资源利用），进而影响干旱区绿洲荒漠化过程。将水足迹应用于天山北坡绿洲荒漠化研究，是对干旱区绿洲荒漠化研究的新尝试，通过这项研究为绿洲荒漠化地区水资源的开发利用和荒漠化预警提供新的思路，为揭示绿洲—荒漠化过程对人类活动的响应机制提供科学基础。

1 水足迹计算方法及其改进

参考 Hoekstra 等学者提出的“水足迹”概念[5]，本文将某地区（市、县）的本地生产水足迹（LPWF）定义为生产该地区所有产出商品和服务所利用的区域内水资源总量，即农作物水足迹、动物水足迹、工业水足迹和生活水足迹的总和。表示为：

$$LPWF = WU_a + WU_l + WU_i + WU_d \quad (1)$$

式中：WU_a——农作物水足迹（m^3/a）；WU_l——动物水足迹（m^3/a）；WU_i——工业水足迹（m^3/a）；WU_d——生活水足迹（m^3/a）。

为探索小尺度（市、县）水足迹计算方法，本文在前人研究的基础上作了部分改进。由于天山北坡干旱少雨，很大一部分耕地都是发展灌溉农业，而在农作物虚拟水含量计算中，作物灌溉与否，所计算出的结果存在较大差异。因此，本文对农作物虚拟水的计算做出如下改进：绿水是源于降水、存储于土壤并通过植被蒸发消耗掉的水资源，因此，在农作物水足迹计算中，不管灌溉与否，都包含这部分虚拟水，称为绿水足迹（CWU_g）。而蓝水是指储存于河流、湖泊等水体以及含水层中的水资源，灌溉用水即为蓝水，因此在计算灌溉作物的水足迹时应将其涵盖，这部分虚拟水也称为蓝水足迹（CWU_b）。

改进后的计算方法如下：

$$WU_a = \sum_{c=1}^{n} (CWU_g \times S_t + CWU_b \times S_{irr}) \quad (2)$$

式中：n——作物种类；CWU_g——绿水足迹；S_t——作物种植面积；CWU_b——蓝水足迹；S_{irr}——作物的灌溉面积，包括露天种植和大棚种植。由于大部分地区级（市、县）统计资料中缺乏灌溉面积这项数据，本文在已获取的土地利用数据基础上，利用 GIS 技术提取出耕地中水浇地的面积（即灌溉面积）。

动物水足迹是指动物从出生到死亡的整个生命周期内所消耗的水量[8]，包括动物所食饲料中所含的虚拟水量、饮用水量和服务用水量，单个动物虚拟水含量（V_a）及动物水足迹计算见式（3），（4）：

$$V_a = V_{feed} + V_{drink} + V_{services} \quad (3)$$

式中：V_{feed}——动物饲料所含虚拟水；V_{drink}——动物饮水量；$V_{service}$——动物服务用水量。

$$WU_l = \sum_{s=specie} V_{a,s} \times N_s \quad (4)$$

式中：$V_{a,s}$——单个动物虚拟水含量；N_s——动物的数量。

其余工业、生活等账户的水足迹计算公式及步骤参考文献[9—10]。

2 天山北坡水足迹计算结果及其时空演变分析

2.1 天山北坡水足迹计算结果

在收集和整理研究区 1960—2007 年 16 个台站的气象数据、社会经济统计数据和土地利用数据的基础上，根据改进后的水足迹计算方法，分别从农作物、动物、工业和生活用水等方面对天山北坡的本地生产总水足迹进行计算，结果见表 1—2。考虑虚拟水贸易平衡后的天山北坡总水足迹和人均水足迹见表 3。

2.2　不同时期天山北坡水足迹演变特征分析

2.2.1　天山北坡生产水足迹变化趋势分析　近 50 a 天山北坡本地生产水足迹时间序列变化如表 1 所示,从 1960—2000 年,天山北坡水足迹由 4.349×10^9 m^3 增加到 1.25×10^{10} m^3,其中 1960—1990 年呈较平稳的上升趋势,平均每年增长 1.74%;1990—2000 年,水足迹由 7.30×10^9 m^3 增加到 1.25×10^{10} m^3,年均增长率达 5.53%,上升趋势明显。然而,2000—2005 年,水足迹有所下降,此后至 2007 年又再次上升。总体来看,近 50 a,天山北坡水足迹呈现较为明显的上升趋势,这与整个新疆水足迹的变化趋势一致[10],也就是说人们的社会经济活动对水资源的需求在不断增加。从表 3 可以看出,2007 年的总水足迹是 1960 年的 1.90 倍,而 2007 年的总人口是 1960 年的 3.36 倍,这说明人口的增加在很大程度上加大了天山北坡总水足迹的增长。

表 1　天山北坡当地生产水足迹各构成成分　10^8 m^3

年份	农作物水足迹	动物水足迹	工业水足迹	生活水足迹	合 计
1960	40.118 1	2.277 0	0.030 8	1.059 9	43.521 4
1970	52.898 3	2.729 8	0.077 7	1.540 0	57.245 8
1980	58.457 0	3.407 9	0.161 5	1.921 8	63.948 1
1990	65.583 5	4.061 3	1.119 7	2.250 5	73.015 1
2000	105.965 5	14.370 0	2.112 0	2.633 2	125.080 7
2005	83.157 7	22.865 4	6.173 0	3.032 4	115.228 4
2007	97.754 5	23.819 0	5.114 0	3.138 9	129.826 3

表 2　天山北坡各市县当地生产水足迹计算结果　10^8 m^3

地 区	1960 年	1970 年	1980 年	1990 年	2000 年	2005 年	2007 年
乌鲁木齐市	4.239 4	6.127 0	6.221 3	5.034 1	10.718 1	10.087 9	10.093 3
克拉玛依市	0.480 7	0.557 1	0.736 2	0.731 5	0.994 8	2.984 9	3.416 1
石河子市	13.679 7	15.648 7	16.064 4	20.435 4	19.438 5	24.417 8	26.056 8
昌吉市	2.434 3	3.516 4	3.162 8	4.389 3	8.641 9	9.972 6	11.609 9
阜康市	1.078 8	1.508 8	1.775 2	1.776 2	3.648 8	3.630 4	4.242 8
呼图壁县	1.953 8	2.661 7	2.783 9	3.698 3	8.113 9	7.895 6	8.831 3
玛纳斯县	2.494 0	3.621 2	4.198 3	3.797 8	8.704 4	7.727 8	8.548 4
奇台县	3.748 4	5.589 1	6.376 1	7.454 4	14.837 3	9.029 8	13.240 8
吉木萨尔县	2.900 7	3.676 2	3.318 9	3.525 4	6.282 8	4.053 4	4.030 3
木垒县	2.308 7	2.883 2	3.268 9	3.735 6	6.335 4	4.948 6	5.161 9
奎屯市	0.035 6	0.043 3	0.063 6	0.182 6	0.274 7	0.723 7	0.894 1
乌苏市	2.257 7	3.432 3	4.418 3	4.154 7	9.876 5	9.509 4	9.725 3
沙湾县	3.636 2	4.573 3	6.592 5	7.060 4	14.983 5	10.081 0	12.188 6
博乐市	1.064 8	1.326 9	2.083 0	2.933 5	5.418 7	4.1889	4.393 8
精河县	0.680 3	1.104 0	1.497 2	1.924 2	3.819 6	3.196 3	3.591 5
温泉县	0.528 2	0.976 6	1.387 4	2.181 6	2.991 8	2.780 3	3.801 4
合 计	43.521 4	57.245 8	63.948 1	73.015 1	125.080 7	115.228 4	129.826 3

表 3　天山北坡总水足迹及人均水足迹　$10^8 m^3$

年份	生 产 水足迹	虚拟水 净进口	总水 足迹	人均水 足迹/m^3
1960	43.521 4	—	43.521 4	2 531
1970	57.245 8	—	57.245 8	2 069
1980	63.948 1	—	63.948 1	1 779
1990	73.015 1	−7.666 5	65.348 6	1 553
2000	125.080 7	−47.442 5	77.638 2	1 610
2005	115.228 4	−35.098 5	80.129 9	1 434
2007	129.826 3	−47.269 6	82.556 7	1 430

2.2.2　天山北坡生产水足迹结构变化分析　近 50 a 来,整个天山北坡的生产水足迹结构发生了明显的变化。农作物水足迹所占比例虽然一直处于主导地位,但也出现了下降趋势,由 1960 年的 92.41% 降至 2007 年的 75.30%;动物水足迹所占比例呈较为明显的增长趋势,由 1960 年的 5.24% 上升到 2007 年的 18.35%;工业水足迹的变化幅度也较大,由 1960 年的 0.07% 上升到 2007 年的 3.94%,增加了近 55 倍,其中在 2005 年达到最大值,为 5.36%;生活水足迹的变化幅度不大,虽然生活水足迹一直处于增长态势,但所占水足迹总量的比例仍然很小,基本上保持在 2%～3%。天山北坡水足迹各成分所占比例变化见图 1。

如果从水足迹的角度来看天山北坡的产业结构发展,可以看出第 1 产业(农牧林渔业)用水量仍然占总生产用水量的绝大部分,2007 年第 1 产业用水的比例达 93.64%,而第 2 产业(工业)用水为 3.94%,第 3 产业(服务)用水仅为 2.42%,同时,天山北坡第 3 产业产值比例分别为 8.1∶53.6∶47.7[7],这与各产业水足迹构成比例极不相称,即 8.1% 的产值消耗

掉了 93%的水资源，表明第 1 产业水资源利用率很低。由此看来，天山北坡各产业的用水结构还不大合理，应完善农业生产结构，提高第 1 产业水资源的利用效率，降低第 1 产业用水，以保障第 2 产业、第 3 产业发展对水资源的需求。

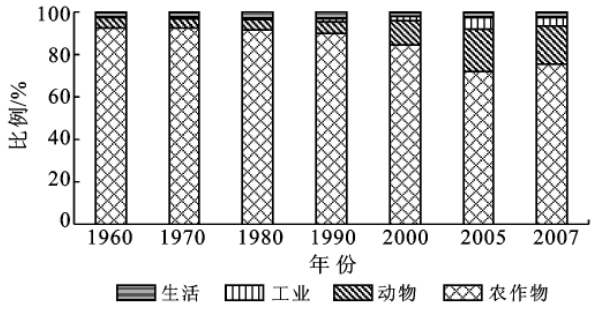


图 1 天山北坡生产水足迹结构变化

2.3 天山北坡生产水足迹空间差异特征分析

天山北坡水足迹计算结果表明，1960—2007 年天山北坡各市县本地生产水足迹的空间差异明显（表 2）。以 2007 年为例，各市县的水足迹波动较大，水足迹最高的地区为石河子市，达 2.61×10^{9} m^3，而水足迹最小的奎屯市仅为 8.90×10^{7} m^3，前者为后者 29 倍多，这表明各市县当地的社会生产活动对水资源的需求存在较大的差距。究其原因，根据本文对水足迹结构的分析可知，在水足迹的各组成成分中农作物用水占总生产水足迹的 70%以上，特别是棉花的单位重量虚拟水含量是一般农作物的 7 倍多，而石河子市农作物产量一直处于较高的水平，如 2007 年的棉花产量占整个天山北坡的近 1/2，大量的农作物用水导致了石河子市整个生产水足迹出现高值。相比石河子市，奎屯市的农作物总产量很低，仅为石河子市的 0.67%，因而其水足迹也仅为石河子的 3.43%。

对比不同时期天山北坡各市县水足迹的空间差异，可以看出不同市县水足迹的差距在不断缩小，其最大值与最小值的倍数由 1970 年的 362 倍缩减至 2007 年的 29 倍，表明各市县社会生产活动对水资源需求的差距在减小，这跟各地区产业结构的调整以及降低单位产品的用水量有关。

2.4 与其他地区水足迹的比较

为便于与国外及国内其他地区的水足迹进行比较，本文采用考虑虚拟水贸易平衡后的天山北坡 2000 年人均水足迹与其他地区比较[11-12]（图 2）。

由图 2 可以看出，2000 年天山北坡的人均水足迹为 1 610 m^3/人，比全球平均高出 29.53%，是国内平均的 2.68 倍。由此看来，天山北坡人均水足迹在国内处于较高的水平。与国外人均水足迹相比，天山北坡远小于美国、加拿大等发达国家，而与其地理位置相近的巴基斯坦和俄罗斯的人均水足迹相对较为接近。

龙爱华等[13]认为人口数量、富裕程度以及气候因素和区位条件在很大程度上影响着水足迹的大小[11]。近年来天山北坡的经济发展取得了较大的进步，但其发展程度远不如发达国家，跟国内其他发达地区相比也还存在一定的差距，因此，跟发达国家相比，其人均水足迹相对较低。由于天山北坡地处内陆干旱区，气候干燥，蒸发力强，作物生长期需水量大，相比国内湿润地区（如南部省市），人均水足迹较高，而与同处于中亚干旱区的巴基斯坦较为接近。

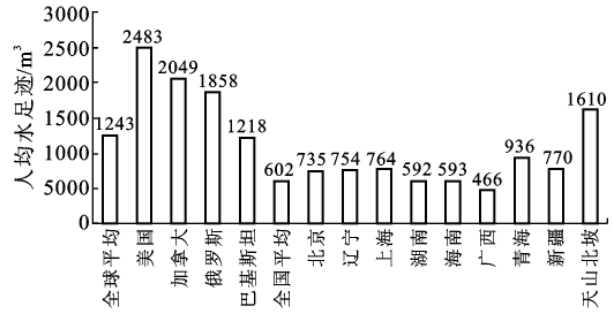


图 2 天山北坡人均水足迹与一些国家和国内其他地区的比较

3 天山北坡绿洲荒漠化的水足迹表征分析

在获取的近 50 a 天山北坡土地利用数据〔由中国科学院新疆生态与地理研究所知识创新重要方向项目“新疆近 50 a LUCC 及其生态环境效应研究”（KZCX3-SW-327）提供〕的基础上，利用 GIS 强大的数据挖掘和空间分析功能，提取研究区荒漠动态变化数据，具体方法见参考文献[14—15]，提取结果见表 4 和图 3。

3.1 天山北坡荒漠化时空演变格局

3.1.1 不同时期天山北坡荒漠化演变特征分析 由表 4 和图 3 可以看出，1960 年以来，天山北坡荒漠面积的变化可以分为 3 个主要阶段：1960—1990 年，荒漠面积由 9.18×10^{6} hm^2 减少至 8.46×10^{6} hm^2，呈逐渐减少趋势，30 a 共减少了 7.26×10^{5} hm^2，年均减少率为 0.27%；1990—2000 年，荒漠面积由 8.46×10^{6} hm^2 减少至 5.70×10^{6} hm^2，10 a 共减少了 2.75×10^{6} hm^2，年均减少率为 4%，呈快速减少趋势；2000—2007 年，荒漠面积由 5.70×10^{6} hm^2 增加至 6.20×10^{6} hm^2，呈平稳上升趋势，7 a 共增加了 4.93×10^{5} hm^2，年均增长率为 1.19%。总体上看，1960—2007 年天山北坡荒漠面积有较大幅度的下降，面积减少了 2.99×10^{6} hm^2，变化幅度达 32.53%。

表 4　不同时期天山北坡荒漠面积变化统计

年 份	1960	1970	1990	2000	2005	2007	1960—2007 变化
荒漠面积/10^4 hm^2	918.16	880.22	845.60	570.18	615.04	619.49	−298.67
占总面积的比例/%	61.37	58.84	56.52	38.11	41.11	41.41	19.96

3.1.2　天山北坡荒漠化空间差异特征分析　从空间上来看,研究期内以乌鲁木齐市、石河子市等为代表的天山北坡中部市县的荒漠面积减幅最大,荒漠化逆转趋势最为明显,说明该区域开垦荒地等人类经济活动较为频繁,绿洲面积扩大,植被出现好转态势;而研究区东、西部市(县)荒漠化逆转趋势也较为明显,但相对于中部市(县),其荒漠面积减幅较小。

2000—2007 年天山北坡中部荒漠化的发展速度最快,东部次之,而西部保持荒漠化逆转趋势,以荒漠化程度加深为特点的荒漠化主要发生在天山北坡中部和东部市(县)。从整个研究期来看,研究区西部市(县)在各研究时段内一直保持荒漠化逆转趋势,这与王伯超等[16]的研究结果一致,说明这些地区在社会经济发展的过程中,人类活动并没有导致荒漠化的发展,而是促使荒漠向绿洲转变。中、东部市(县)在前期(1960—2000 年)表现为荒漠化逆转,后期(2000—2007 年)则表现为荒漠化发展趋势,说明研究区大部分地区人类活动对自然环境的过度干扰,或是对水土资源的不合理利用,促使了绿洲向荒漠发展[3]。

3.2　天山北坡荒漠化与水足迹的相关分析

为分析干旱区绿洲荒漠化与水资源利用之间的关系,本文计算了不同时期天山北坡的水足迹,以水足迹来反映研究区水资源利用的情况,同时提取了天山北坡不同时期的荒漠面积。在此基础上,进一步分析干旱区绿洲荒漠化与水足迹之间的关系。

由图 3 可知,天山北坡荒漠面积与水足迹之间的相关关系可以用线性函数 $y=-4.131\ 8x+1\ 117.4$ 进行拟合(y 为荒漠面积,x 水足迹),其 R 值为 0.983 2,具有很强的相关性(通过 $a=0.01$ 的显著性检验),表明研究区荒漠化的发展趋势很大程度上依赖于水足迹的变化,即绿洲荒漠化与水足迹(水资源利用情况)之间存在极显著的负相关性。

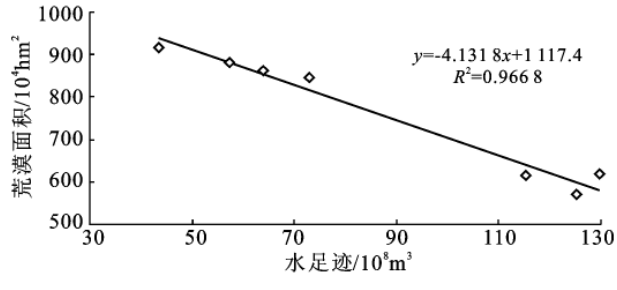


图 3　天山北坡水足迹与荒漠化面积的相关分析

水足迹能比较真实地反映一个国家或地区居民生产和生活对水资源系统产生的压力,为保障干旱地区的水资源安全提供有益的决策依据,为干旱区绿洲荒漠化研究提供新的思路。虚拟水战略主要是通过水—产品—贸易之间的关系来体现,而虚拟水贸易是一种新的水资源供应方式,可以作为实现国家或区域水资源安全的一种调节工具[9,12]。2007 年天山北坡虚拟水输出达 4.76×10^9 m^3,占当年本地生产水足迹的 36.62%。这对水资源缺乏的天山北坡来说就意味着:(1) 出口水资源密集型产品,相当于输出了大量的虚拟水资源,给本来缺乏水资源的干旱区带来巨大的水资源压力;(2) 出口产品的生产(如粮食、经济作物等)要消耗更多的化肥和农药,也给当地的水环境造成更大的污染。另外,龙爱华等[17]的研究表明,减少农村居民消费粮食的数量和增加消费多样性,有利于减小对水资源系统的压力。因此,在适当减少虚拟水输出的同时,进口一定数量的水资源密集型产品,相当于进口了一定量的虚拟水;而在不影响人民生活质量的前提下,适当改变消费模式,减少对棉花、肉类等虚拟水含量较高的产品的消费,增加蔬菜、水果等虚拟水含量低的产品消费,这都有利于缓解当地的水资源压力,为当地生态环境的恢复与保护留足生态用水,从而实现荒漠向绿洲的正向转化。

4　结 论

(1) 1960—2007 年,天山北坡水足迹呈较为明显的上升趋势,也就是说人们的社会经济活动对水资源的需求在不断增加。同时,水足迹结构发生了明显的变化。农作物水足迹所占比例虽然一直处于主导地位,但出现下降趋势;动物水足迹所占比例呈较为明显的增长趋势;工业和生活水足迹的变化幅度不大。

(2) 天山北坡各市县本地生产水足迹的空间差异明显,表明各市县当地的社会生产活动对水资源的需求存在较大的差距。对比不同时期天山北坡各市县水足迹的空间差异,可以看出不同市县水足迹的差距在不断缩小,表明各市县社会生产活动对水资源需求的差距在减小,这跟各地区产业结构的调整以及降低单位产品的用水量有关。

(3) 天山北坡人均水足迹低于发达国家和国内其他发达地区,而与地理位置相近、自然环境和气候条件相似的中亚国家(如巴基斯坦)较为接近。这表

明人口数量、富裕程度以及气候因素和区位条件在很大程度上影响着水足迹的大小。

通过研究天山北坡荒漠面积与水足迹之间的关系，表明两者存在显著的负相关性。在此基础上，本文从水足迹的角度对天山北坡绿洲荒漠化的过程机制进行了分析，结果表明调整地区生产结构（特别是农业）和改善区域居民的消费模式都有利于减轻干旱区水资源压力，为干旱区绿洲荒漠化的预警与防治研究提供了一个崭新的视角。

水资源足迹衡量不仅为干旱区水资源管理提供科学依据，同时对干旱区荒漠化的预警和防治具有重要的战略启示。但从目前有关水足迹的研究来看，还存在一些需要完善的地方。例如，水足迹计算的影响因素较多，虽然本研究已对农作物虚拟水含量的计算方法进行了改进，但受限于统计资料的收集、考虑的产品类型有限等因素，有关天山北坡水足迹的计算还只是一种粗略的、保守的估计。另外，目前多数有关水足迹的研究都关注于人类活动对水量的影响，而人类活动对水质的影响却被忽略，或很少考虑，进一步的研究应将因水环境恶化产生的水足迹涵盖进去。可以预见的是，随着水足迹研究的进一步完善，它在干旱区绿洲—荒漠化过程的机理研究和荒漠化预警中将发挥更大的作用。

[参 考 文 献]

[1] 王涛. 干旱区绿洲化、荒漠化研究的进展与趋势[J]. 中国沙漠，2009，29(1)：1-9.

[2] 王玉朝，赵成义. 绿洲—荒漠生态脆弱带的研究[J]. 干旱区地理，2001，24(2)：182-188.

[3] 肖波，塔西甫拉提·特依拜. 基于人地关系理论的荒漠化—绿洲化演变研究：以新疆于田县为例[J]. 水土保持通报，2006，26(5)：98-101.

[4] 张雪艳，吴世新. 天山北坡绿洲荒漠典型地区土地荒漠化变化的时空特征分析[J]. 中国沙漠，2006，26(2)：208-214.

[5] Hoekstra A Y. Virtual water：an introduction[C]// Virtual Water Trade：Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade-Value of Water Research Report Series. The Netherlands：IHE，2003：13-23.

[6] 新疆成立五十周年筹委会，新疆统计局. 新疆五十年(1955—2005)[M]. 北京：中国统计出版社，2005.

[7] 新疆年鉴编委会. 新疆统计年鉴(2001—2010 年)[M]. 北京：中国统计出版社，2010.

[8] Garrido A，Llamas M R，Varela-Ortega C，et al. Water Footprint and Virtual Water Trade in Spain[M]. London：Springer，2010：36-43.

[9] 龙爱华，徐中民，张志强. 西北四省(区)2000 年的水资源足迹[J]. 冰川冻土，2003，25(6)：692-700.

[10] 张燕，徐建华，吕光辉. 西北干旱区新疆水资源足迹及利用效率动态评估[J]. 中国沙漠，2008，28(4)：775-80.

[11] Hoekstra A Y，Chapagain A K. Globalization of Water：Sharing the Planet′s Freshwater Resources [M]. Blackwell，Oxford，2008：7-19.

[12] 王新华，徐中民，龙爱华. 中国 2000 年水足迹的初步计算分析[J]. 冰川冻土，2005，27(5)：774-780.

[13] 龙爱华，徐中民，王新华，等. 人口、富裕及技术对 2000 年中国水足迹的影响[J]. 生态学报，2006，26(10)：3358-3365.

[14] 张宏，林先成，李世强. 荒漠化评价指标体系的等级系统研究[J]. 四川师范大学学报：自然科学版，2005，28(3)：358-361.

[15] 吴见，彭道黎. 以土地利用为基础的多伦县沙质荒漠化评价遥感信息模型[J]. 中国农业大学学报，2010，15(2)：114-121.

[16] 王伯超，塔西甫拉提·特依拜，张飞，等. 基于数字遥感图像的艾比湖绿洲近 30 年动态变化研究[J]. 水土保持通报，2007，27(2)：107-111.

[17] 龙爱华，张志强，徐中民，等. 甘肃省水资源足迹与消费模式分析[J]. 水科学进展，2005，27(3)：418-425.