DOI:10.15928/j.1674-3075.202107020228

塔里木河流域水土流失动态变化分析

刘雨曈

（四川大学水利水电学院，四川 成都 610065）

摘要：研究塔里木河流域土地利用变化、年径流量和输沙量变化特征及其相关关系，以期促进水土资源的合理开发和利用，为塔里木河流域的生态环境治理提供科学依据。水文数据为2005-2020年流域焉耆站、同古孜洛克站、卡群站、西大桥站、阿拉尔站年径流量、年输沙量，土地利用数据为1980-2015年土地利用空间分布数据。结果表明：（1）1980-2015年，土地利用面积比例变化为-1.07%~1.16%，耕地面积增幅为1.16%，沙地面积增幅0.30%，草地面积降幅1.07%；（2）流域内各主要河流多年平均径流量为22.99×10^9~76.46×10^9 m^3，多年平均输沙量63.20×10^4~3470.00×10^4t；开都河多年平均含沙量为0.24 kg/m^3，其余河流平均含沙量均大于4kg/m^3；塔里木河流域年径流量和年输沙量均呈现下降变化趋势，且年输沙量的变异性（40.89%~73.11%）大于年径流量（15.54%~35.37%）；（3）各主要河流的年径流量、年输沙量与耕地和城乡居民用地的占比均呈负相关关系，与林地、草地、沙地等均呈现正相关关系。建议合理进行土地开发，禁止盲目开荒种田，充分运用智能化手段开展在线动态监测，及时掌握水土流失情况，恢复和重建塔里木河流域生态。

关键词：土地利用；径流量；输沙量；塔里木河流域

中图分类号：S157.1 **文献标志码：**A **文章编号：**1674-3075(2022)03-0105-08

塔里木河流域位于新疆南部，流域总面积达到102×10^4 km^2，干流全长1 321 km，流域内的河流大部分自身不产流，依靠各源流汇入补给，由和田河、叶尔羌河、阿克苏河源流、孔雀河与塔里木河干流一起形成目前的“四源一干”格局（刘志丽等，2003）。塔里木河是我国最大的内陆河，塔里木河流域是重要的粮棉生产基地和石油化工基地（闫正龙等，2008；焦居仁等，2001）。流域属典型的温带干旱大陆性气候，年均径流量约410×10^8 m^3，年均蒸发量在3 000 mm以上，年均降水量仅为60 mm，属于极端干旱区。塔里木河地处世界第二大流动性大沙漠塔克拉玛干沙漠腹地，天然植被稀疏，流域内生态环境脆弱且问题复杂多样（邓铭江，2006；陈亚宁等，2004；陈曦等，2016），植被类型属暖温带稀疏灌木、半灌木，主要建群种有胡杨、怪柳、芦苇、罗布麻和花花柴等（张卫国，2014）。高山冰川和山区降水形成塔里木河水系，因此气温和降水直接决定塔里木河源流的径流量，也间接影响塔里木河干流的来水量（徐海量等，2005）。

受气候条件变化和人类活动等影响，塔里木河干流下游多次发生干涸断流情况，在频繁干旱的环境条件下，气候变化、水土流失等加剧塔里木河流域生态环境退化（张帅等，2021a；张帅等，2021b；齐静等，2021），过度放牧、滥挖滥采、毁林毁草开荒以及水土资源的不合理利用等活动是导致目前塔里木河干流沙漠化持续扩张的重要原因（吐尔逊•哈斯木等，2011）。通过遥感技术对塔里木河干流地区1999–2004年的土地利用状况监测，表明干流上中游地区的生态环境逐步好转，耕地面积、用水量均呈增大趋势，但下游生态环境日趋恶化(闫正龙，2008)。对塔里木河流域中下游生态环境变化调查分析，发现塔里木河中下游天然植被大面积衰败和死亡，致使沙漠化面积不断扩大（刘志丽等，2003）。研究发现随着流域水资源开发及利用，塔里木河干流径流量持续减少（克衣木•买卖提，2020）。塔里木河流域土地利用和年际径流输沙等变化均表明其生态环境问题的严峻性，已严重影响到流域社会经济的可持续发展（焦居仁等，2001；克衣木•买卖提，2020；邓铭江，2006）。因此，开展流域内土地利用及水土流失动态分析，可为西北干旱区以及全球生态环境变化提供区域信息，对实现区域经济可持续发展具有重要意义。本研究利用水土流失动态监测数据对塔里木河流域土地利用及年径流量、输沙量进行分析，探讨塔里木河流域土地利用变化、年径流量和输沙量变化特征及其相关关系，以期促进水土资源的合理开发和利用，为塔里木河流域的生态环境治理提供科学依据。

收稿日期：2021-07-02

基金项目：国家自然科学基金项目（51879278）。

作者简介：刘雨曈，2001年出生，主要从事水力学研究。E-mail：944786820@qq.com

1 研究方法

1.1 数据来源

2005−2020年流域各水文站年径流量、年输沙量数据来源于中国河流泥沙公报（焉耆站、同古孜洛克站、卡群站、西大桥站、阿拉尔站，见图1。），1980−2015年土地利用空间分布数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心（http://www.resdc.cn）。

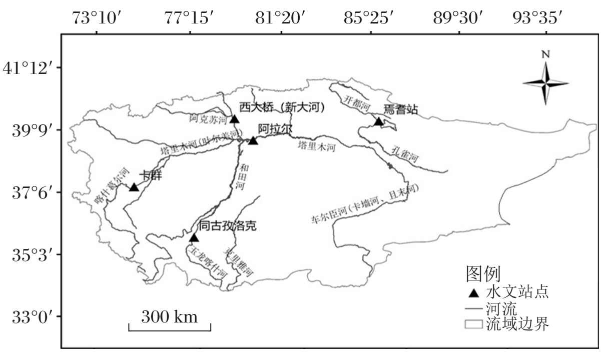


图1　研究区监测点位置示意

Fig. 1　Location of monitoring sites in the study area

1.2 数据处理

基础数据分析采用ArcGIS软件处理形成塔里木河流域的数据集，Excel 2019软件处理，统计分析采用SPSS 25软件，图形绘制采用Origin 2021软件。

2 结果与分析

2.1 塔里木河流域土地利用变化

1980−2015年塔里木河流域土地利用面积变化见图2、表1~表3，土地利用变化以1980−2015年各土地利用类型面积占总流域面积的比例增减变化表示。

1980−2015年，塔里木河流域土地利用主要以沙地、草地、戈壁、裸岩石质地为主，平均值占流域总面积的15.00%~29.18%；其次是耕地、水域、盐碱地、林地，平均值在1.21%~3.84%；其余土地利用占比较少，平均值在0.16%~0.47%。该时期流域内各土地利用面积发生不同程度的变化，耕地、林地、水域、城乡居民用地、沙地、沼泽地、裸岩石质地总体呈增加变化趋势，其中耕地先减后增，林地是先减再增后减；草地、水域是先增后减；城乡居民用地持续增加；未利用土地先增后减。增加面积分别占流域总面积在0.02%~1.16%；其余土地利用类型呈减少变化趋势，减少面积分别占流域总面积在0.02%~1.16%。耕地面积增加最大，占流域总面积的1.16%；其次是沙地，增加了0.30%。草地面积减少最严重，减少了1.07%；其次是戈壁和盐碱地，分别减少了0.33%和0.22%。由此可以看出，人类活动的影响导致耕地和城乡居民用地面积增加，草地面积减少严重，沙地面积呈增加变化。

塔里木河流域67%以上面积为未利用土地，沙地、戈壁、裸岩石质地占到了未利用土地面积的92%以上。沙质土是造成水土流失的基础物质条件，频繁大风气候作用使得水土流失的外部动力条件形成，是导致沙尘暴危害加剧，流域汛期水土流失加重的重要潜在因素。

2.2 塔里木河流域年径流量与年输沙量变化

塔里木河流域2005−2020年各水文站多年平均径流量、平均输沙量及平均含沙量见图3。流域内各主要河流多年平均径流量在22.99×10^9~76.46×10^{9}m^3，多年平均输沙量在63.20×10^4~3 470.00 ×10^{4}t。多年平均含沙量表现为阿克苏河、叶尔羌河、玉龙喀什河、塔里木河干流均大于4 kg/m^3，属于高含沙水流标准，变化范围在4.28~5.25 kg/m^3，这与河流附近土地利用有密切的联系；而开都河多年平均含沙量仅为0.24 kg/m^3，可能是由于开都河流域未利用土地呈下降趋势，草地、林地、水域等增多，植被覆盖率提高。

各主要水文站点年径流量与年输沙量变化见图4。塔里木河流域不同支流年径流量和年输沙量差异较明显，且年输沙量与年径流量总体呈相似的变化趋势，但其变化幅度存在明显差异。具体表现为：阿克苏河、叶尔羌河、玉龙喀什河、塔里木河干流的年径流量和年输沙量均表现为随时间的变化呈波动式下降变化；开都河年径流量则表现为增加的变化趋势，但输沙量呈递减趋势。

年径流量。2020年与2005年比较，叶尔羌河、塔里木河干流年径流量减少较多，分别达到27.76%和26.93%，变异系数为15.54%和35.37%；而玉龙喀什河、阿克苏河减少量较少，分别为1.01%、5.06%，变异系数分别为19.25%、25.53%；开都河年径流量增加了24.73%，变异系数为23.72%。

年输沙量。2020年与2005年比较，开都河、阿克苏河、叶尔羌河、玉龙喀什河、塔里木河干流年输沙随时间的变化均呈波动式减少的变化趋势，分别减少了87.13%、50.00%、87.96%、43.96%和64.11%，变异系数分别为73.11%、40.89%、47.85%、69.80%和56.30%。

整体上，塔里木河流域年径流量和年输沙量均呈现下降变化趋势，且年输沙量的变异性（40.89%~73.11%）大于年径流量变异性（15.54%~35.37%）。

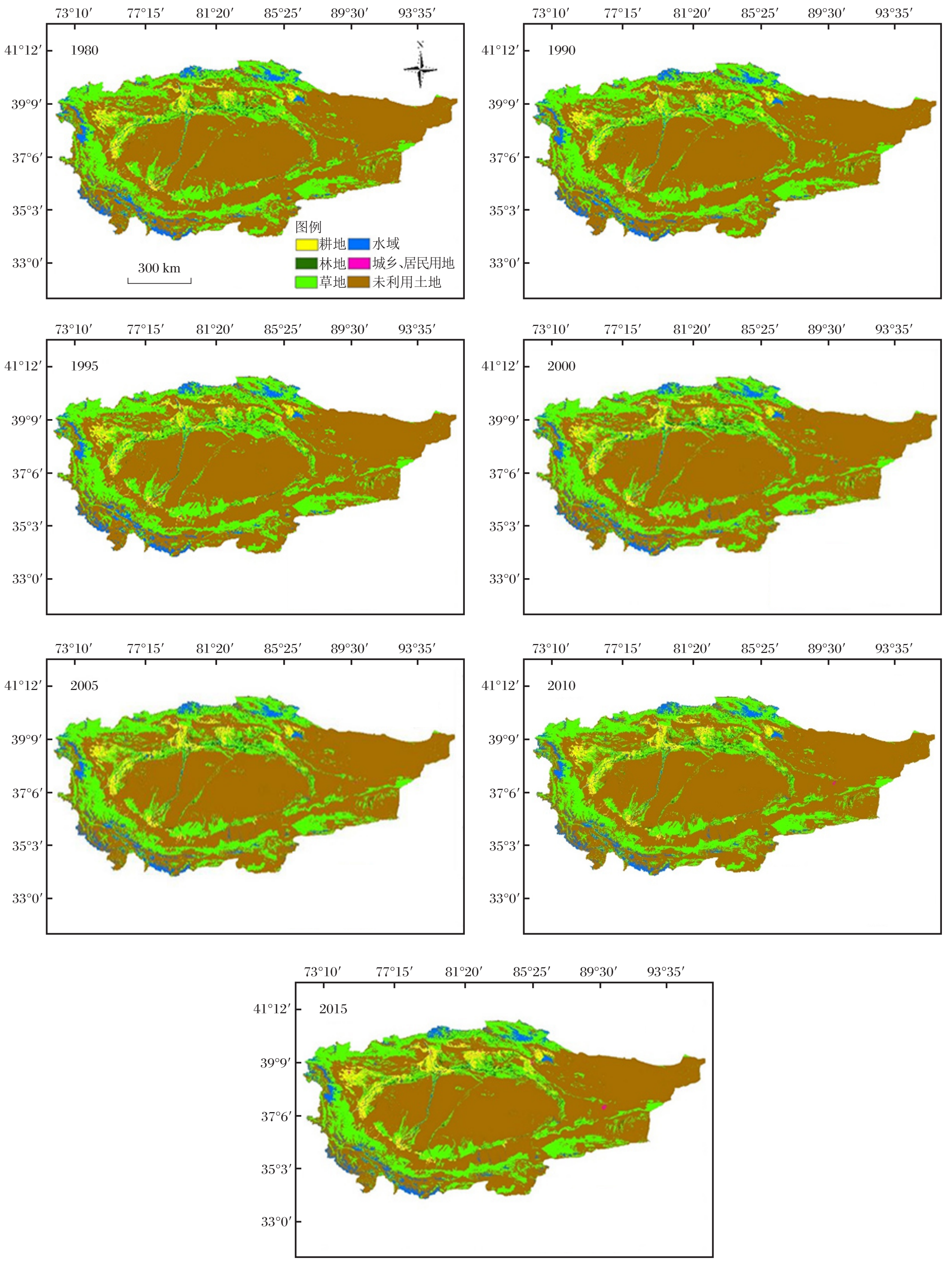


图2　1980−2015年塔里木河流域土地利用年际变化

Fig.2　Annual change in land use in the Tarim River Basin (1980−2015)

表 1　1980-2015 年塔里木河流域土地利用情况

Tab.1　Land use information for the Tarim River basin (1980-2015)

土地利用类型		耕地	林地	草地	水域	城乡居民用地	未利用土地
1980 年	面积/km^2	25167	12688	259968	36110	1426	701109
	比例/%	2.43	1.22	25.08	3.48	0.14	67.64
1990 年	面积/km^2	24485	10792	262042	36177	1606	701346
	比例/%	2.36	1.04	25.28	3.49	0.15	67.67
1995 年	面积/km^2	24637	10677	262199	36128	1594	701113
	比例/%	2.38	1.03	25.3	3.49	0.15	67.65
2000 年	面积/km^2	26920	13924	254603	36670	1440	702909
	比例/%	2.60	1.34	24.56	3.54	0.14	67.82
2005 年	面积/km^2	30643	13530	252240	36540	1561	701952
	比例/%	2.96	1.31	24.34	3.53	0.15	67.73
2010 年	面积/km^2	31679	13279	252172	36165	1701	701470
	比例/%	3.06	1.28	24.33	3.49	0.16	67.68
2015 年	面积/km^2	37208	12870	248825	36157	2285	699121
	比例/%	3.59	1.24	24.01	3.49	0.22	67.45

表 2　未利用土地细分　km^2

Tab.2　Subdivision of unused land

未利用土地类型	1980 年	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年
沙地	300918	299677	299022	304737	304525	304389	304013
戈壁	157464	155695	155580	155238	155021	154901	154080
盐碱地	40660	40255	40337	39902	39574	39335	38401
沼泽地	2954	3091	2825	3440	3264	3313	3204
裸土地	5248	4905	4877	4918	4898	4871	4787
裸岩石质地	190539	194363	195078	191348	191340	191331	191308
其他	3326	3360	3394	3326	3330	3330	3328

表 3　1980-2015 年塔里木河流域土地利用面积　%

Tab.3　Change in area (%) of each land use type in Tarim River basin (1980-2015)

土地利用类型		1980 年	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	土地利用变化
耕地		2.43	2.36	2.38	2.6	2.96	3.06	3.59	1.16
林地		1.22	1.04	1.03	1.34	1.31	1.28	1.24	0.02
草地		25.08	25.28	25.3	24.56	24.34	24.33	24.01	-1.07
水域		3.48	3.49	3.49	3.54	3.53	3.49	3.49	0.01
城乡居民用地		0.14	0.15	0.15	0.14	0.15	0.16	0.22	0.08
未利用土地	沙地	29.03	28.91	28.85	29.40	29.38	29.37	29.33	0.30
	戈壁	15.19	15.02	15.01	14.98	14.96	14.95	14.87	-0.33
	盐碱地	3.92	3.88	3.89	3.85	3.82	3.80	3.70	-0.22
	沼泽地	0.28	0.30	0.27	0.33	0.31	0.32	0.31	0.02
	裸土地	0.51	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.46	-0.04
	裸岩石质地	18.38	18.75	18.82	18.46	18.46	18.46	18.46	0.07
其他		0.32	0.32	0.33	0.32	0.32	0.32	0.32	0.00

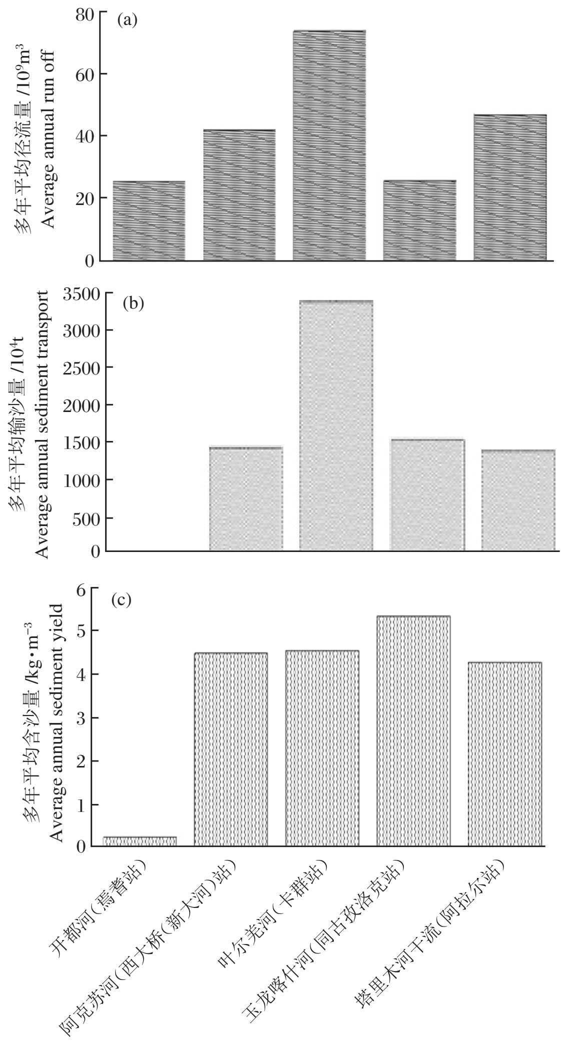
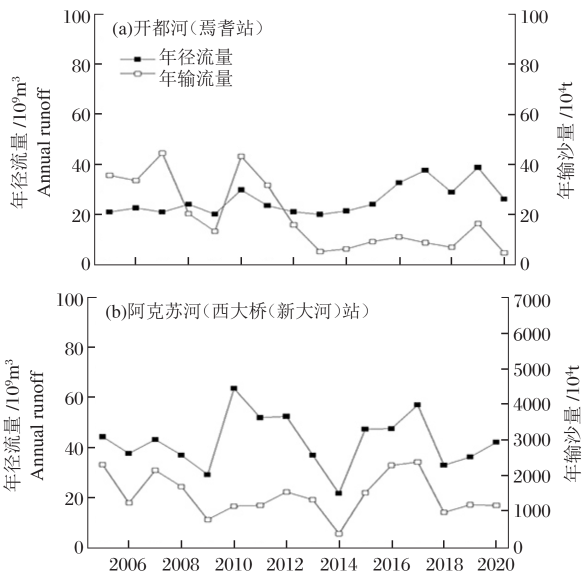


图3　2005-2020年主要水文站多年平均径流量及多年平均输沙量、含沙量

Fig.3　Average annual runoff, sediment transport and sediment yield at the primary hydrological stations (2005-2020)



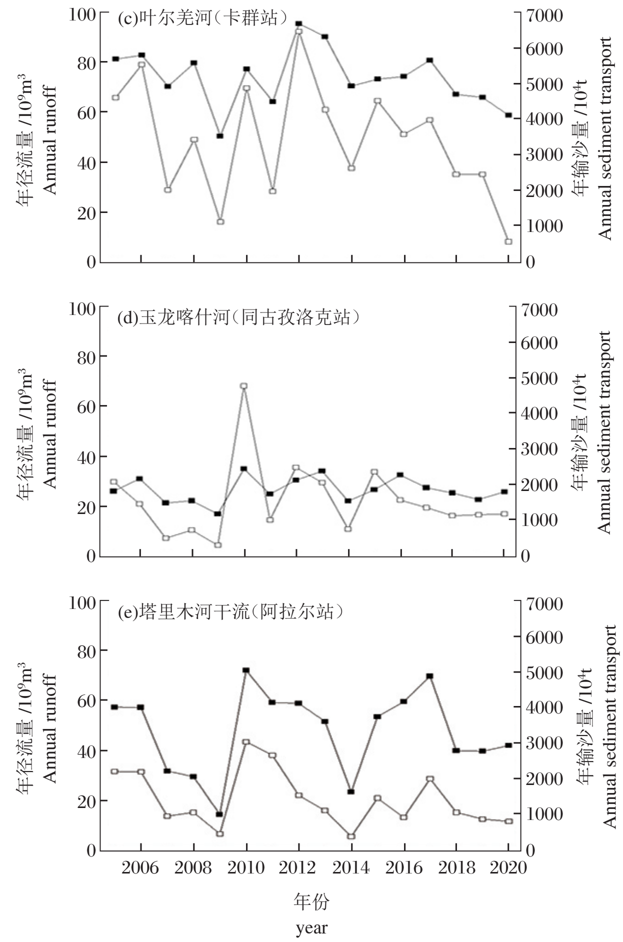


图4　2005-2020年塔里木河流域主要水文站点年径流量与年输沙量变化

Fig.4　Variation of annual runoff and sediment transport at the primary hydrological stations in the Tarim River basin (2005-2020)

2.3　年径流量、输沙量与土地利用关系

采用同期2005、2010、2015年塔里木河流域土地利用情况、流域内各主要水文站点的年径流量、年输沙量数据进行相关分析,结果如图5。各河流的年径流量和年输沙量与耕地和城乡居民用地的占比均呈负相关关系,说明耕地面积、城乡居民用地面积的增加可使流域内径流量和输沙量减少,人类活动影响流域内径流产沙。此外,年径流量、年输沙量与林地、草地、沙地、戈壁、盐碱地、沼泽地、裸土地均呈现正相关关系。

3　讨论

3.1　人为因素与自然气候条件决定水土流失发生

土地利用类型变化是不同土地类型之间复杂的相互转化过程,受自然因素和人类活动双重作用影响(闫正龙,2008)。土地利用与生态环境之间相互制

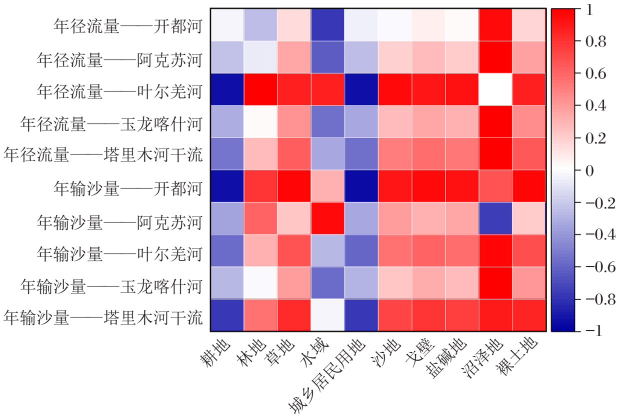


图5　塔里木河流域年径流量、年输沙量与土地利用相关分析

Fig. 5　Correlation matrix for annual runoff, annual sediment transport and land use in the Tarim River basin

约，土地利用必然引起生态环境的变化（刘新平和孟梅，2011）。人类活动是塔里木河干流区土地利用变化的最直接驱动力（赵锐锋等，2009），以往研究表明，人类活动是造成流域水土流失的重要原因之一（邓建强，2017）。1980–2015年，塔里木河流域城乡居民用地、耕地明显增加，其中城乡居民用地变化最大，增幅达60.2%，耕地面积变化次之，增幅47.8%，草地和未利用土地相应减少；在未利用土地中，沙地、戈壁和裸岩石质地占比最大，占未利用土地面积的92%以上。表明塔里木河流域近年来人为扰动剧烈，是水土流失加剧的主要因素之一。

随着人类活动的加剧，塔里木河流域的水土保持生态系统发生了较大的变化（闫正龙，2008；宋艺等，2004）。研究发现塔里木河流域伴随着农业面积的增加，自然植被的面积相应减少，且中下游天然植被大面积衰败和死亡，致使沙漠化面积不断扩大（刘志丽等，2003）。研究也发现塔里木河流域开荒导致的耕地面积的扩大，致使植被遭到破坏，生态环境逐步恶化（刘新平和孟梅，2011）。由此可推测，塔里木河流域人类生产活动与自然环境存在较显著的矛盾，也是致使生态环境趋于恶化的主要原因之一。气候变化导致水文条件变化，进而促使生态环境恶化，河道植被的退化加速了土地荒漠化，是造成塔里木河流域水土流失的另一主要原因。

3.2　年径流量递减及土地不合理利用加剧水土流失

水土保持措施种类繁多（吕建康，2021）。研究显示，淤地坝、梯田、沟道等工程措施在黄河流域治理效果较好，坡耕地整治、栽植水土保持林、种植经果林等措施在长江流域应用较广。水土保持措施须因地制宜，针对不同区域的特征，采用合理的水保措施。塔里木河流域由于近年来年径流量减少，耕地面积扩大，植被面积缩减，流域内荒漠化现象未得到完全治理，水土流失现象十分严峻。

塔里木河流域处在干旱地区，主要侵蚀为风力侵蚀，由于土壤的砂质易于冲刷，需要更新大面积死亡的胡杨林以防风固沙；冲刷带来的泥沙淤积导致河流上中游大量耗水，输水量不足，需要疏通河道并设置工程设施减小冲刷。绿洲生态系统的维护要考虑水资源的利用和次生盐渍化的防治，此外改善土地利用情况也是必不可少的防治水土流失的有效措施。

研究发现，2005–2020年，塔里木河干流的年径流量总体上呈下降的变化趋势（减少了26.93%），其中2010–2014年迅速下降。这是由于流域内年径流量不仅受气候变化的影响，同时还与流域内水土资源开发利用有着紧密的关系，从土地利用上来看，2010–2015年期间耕地面积增加了0.53%。人类土地利用方式改变而产生的土地覆被变化，是短期内流域水文变化的主要驱动因素之一（薛林等，2017）。本研究表明，年径流量、年输沙量与耕地面积、城乡居民用地呈负相关关系，与林地、草地呈现正相关关系，与满苏尔•沙比提和努尔卡木里•玉素甫（2010）的研究结论相似，表明塔里木河径流量受人类活动特别是耕地面积变化、灌溉引用水量等影响较大。另外有研究（彭彬等，2015；金栋梁，1989；赵虎等，2001；樊自立，1996；毛晓辉，2001）指出，塔里木河流域农业用水大多挤占了生态用水，是造成区域生态环境恶化的重要原因之一。因此，亟需加强塔里木河流域水资源的管理与利用，合理进行土地开发，禁止盲目开荒种田，充分运用智能化手段开展在线动态监测，及时掌握水土流失情况，恢复和重建塔里木河流域生态。

参考文献

陈亚宁，张小雷，祝向民，等，2004. 新疆塔里木河下游断流河道输水的生态效应分析[J]. 中国科学(D辑:地球科学)，(5):475–482.

陈曦，包安民，古丽•加帕尔，2016. 塔里木河流域生态系统综合检测与评估[M]. 北京:科学出版社.

邓建强，2017. 鄂西南土地整治区水土流失阻控及生物质炭改土效应研究[D]. 南京:南京农业大学.

邓铭江，2006. 塔里木河流域气候与径流变化及生态修复[J]. 冰川冻土，(5):694–702.

樊自立，1996. 新疆土地开发对生态与环境影响及对策研究[M]. 北京:气象出版社.

焦居仁, 郇源临, 徐传早,等,2001. 对塔里木河流域水保生态建设的几点浅识[J]. 中国水土保持,(12):5-7.

金栋梁, 1989. 森林对水文要素的影响[J]. 人民长江,(1):28-35.

克衣木•买卖提,2020. 浅谈塔里木河流域干流生态恢复与治理[J].资源节约与环保, (12):22-23.

吝静, 赵成义, 马晓飞,等, 2021. 基于生态系统服务价值的塔里木河干流土地利用结构优化[J]. 干旱区研究, 38(4):1140-1151.

刘志丽, 马建文, 陈嘻,等,2003. 利用3S技术综合研究新疆塔里木河流域中下游11年生态环境变化与成因[J]. 遥感学报, (2):146-152,164-165.

刘新平, 孟梅, 2011. 土地持续利用与生态环境协调发展的耦合关系分析——以塔里木河流域为例[J]. 干旱区地理, 34(1):173-178.

吕建康,2021. 水土流失的生态修复与综合治理措施[J]. 新农业,(13):38.

毛晓辉,2001.塔里木河流域水资源可持续利用战略研究[J]. 干旱区地理, (2):136-140.

满苏尔•沙比提, 努尔卡木里•玉素甫, 2010. 塔里木河流域绿洲耕地变化及其河流水文效应[J]. 地理研究, 29(12):2251-2260.

彭彬, 杨昆,李建,等, 2015. 基于SWAT和GIS的洱海流域土地利用变化对径流影响的研究[J]. 长江科学院院报,32(4):7-11, 17.

宋艺, 孙培新, 郭凯,2004. 塔里木河上中游的水土流失及防治对策[J]. 中国水土保持,(7):11-12.

吐尔逊•哈斯木, 曼尼萨汗•吐尔隼, 祖木拉提•伊布拉音,等, 2011. 导致塔里木河流域土地沙漠化扩展的深层次原因分析[J]. 中国沙漠, 31(6):1380-1387.

薛林，杨芳，杨超，等,2017. 气候变化和人类活动对塔里木河流域径流变化的潜在影响[J].科学通报,7(1):8254.

徐海量,叶茂,宋郁东,等,2005.塔里木河流域水文过程的特点初探[J]. 水土保持学报, (2):157-158.

闫正龙, 黄强, 畅建霞,等,2008. 塔里木河干流土地利用动态监测遥感分析[J]. 农业工程学报, (03):119-123.

闫正龙, 2008. 基于RS和GIS的塔里木河流域生态环境动态变化与生态需水研究[D]. 西安:西安理工大学.

张帅, 汪洋, 安沙舟, 2021a. 典型内陆盆地生态系统服务价值对土地利用变化的响应[J]. 新疆农业科学, 58(4):766-777.

张帅, 汪洋, 夏婷婷,等, 2021b. 塔里木河生态输水条件下土地利用/覆被变化对生态系统服务价值的影响[J]. 干旱区地理, 44(3):739-749.

张卫国,2014. 塔里木河干流土地利用/覆被变化与植被盖度研究[J]. 黑龙江水利科技, (7):1-4.

赵锐锋, 陈亚宁, 李卫红,等,2009. 塔里木河干流区土地覆被变化与景观格局分析[J].地理学报,64(1):95-106.

赵虎, 晏磊, 季方,2001. 塔里木河干流上游土地利用动态变化研究[J]. 干旱区资源与环境, (4):40-43.

（责任编辑　张俊友）

Soil Alteration and Water Loss in the Tarim River Basin

LIU Yu-tong

(College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, P.R. China)

Abstract: Soil erosion is a common concern and an urgent problem all over the world. This study was carried out to clarify the current state of soil and water loss in the Tarim River basin and put forward countermeasures to improve the situation. The variation of land use in the area from 1980 to 2015, and the annual runoff and sediment transport from 2005 to 2020 were analyzed. The correlations between land use change, annual runoff, and sediment transport in the Tarim River basin were then explored. Finally, based on the spatial distribution of land use, runoff and sediment transport in four tributary basins (Kaidu River, Aksu River, Yerqiang River and Yulongkashi River) during the same period, the causes and trends of soil erosion in the Tarim River basin were discussed from the perspective of human factors and natural climate conditions. Results show that: (1) The percentage changes among the various land uses, over the entire basin from 1980 to 2015, ranged from −1.07% to 1.16%. The largest increase was in cultivated land area (1.16%), sandy land increased by 0.30% and the largest decrease was in grassland area (1.07%). (2) The annual average runoff to the primary rivers in the basin was 22.99×10^9–67.46×10^9 m^3, and the annual average sediment transport was 63.20×10^4–$3\,470.00\times10^4$ t. The average sediment concentration of Kaidu River was 0.24 kg/m^3, while the average sediment concentration in other rivers was more than 4 kg/m^3, categorized as high sediment flow. Due to climate conditions and land use changes, the annual runoff and sediment yield in the Tarim River basin trended downward, and the variability of annual sediment yield (40.89%–73.11%) was higher than the variability of annual runoff (15.54%–35.37%). (3) The annual runoff and sediment transport in the primary rivers were negatively correlated with the proportion of cultivated land and residential land (both urban and rural), and positively correlated with woodland, grassland, and sandy land. Based on the above results, we recommend implementing a plan for the rational development of land use in the basin, conducting online dynamic monitoring of land use to better understand the status of soil and water loss, and the reconstruction and restoration of the Tarim River basin ecosystem. These results provide a scientific basis for the sustainable development and utilization of water and soil resources and environmental management in the Tarim River basin.

Key words: land use; runoff; sediment transport; Tarim River basin