

# 1958–2006 年玛纳斯河流域水系结构时空演变 及驱动机制分析

凌红波<sup>1,2</sup>, 徐海量<sup>1</sup>, 乔木<sup>1</sup>, 樊自立<sup>1</sup>, 史薇<sup>1,2</sup>, 张青青<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘 要:** 为了研究玛纳斯河流域水系结构演变状况, 利用其 1958、1976、1987、2006 年 4 期遥感影像图, 在 ArcInfo 支持下进行目视解译, 根据解译结果, 定量分析了水系长度、密度、分枝比、长度比和分维等参数的变化特征, 并探讨其主要驱动因素。研究表明: 1958–2006 年玛纳斯河流域水系变化满足 Horton 定律, 水网数目及河道平均长度随水网级别呈几何级数变化, 并且水网密度、水系长度比、分枝比等参数持续增大; 流域内绿洲地区水网密度高于南部源流山区与北部荒漠区, 这种区域差异是由不同生态经济单元的自然生态环境类型、社会经济发展状况, 综合发展需求及生态修复重建等方面共同决定的; 玛纳斯河流域水资源量近 50 年来不断增加, 人口数量持续攀升, 耕地与绿洲面积不断扩大等因素是玛纳斯河流域水网结构演变的主要驱动力。然而耕地不能无限扩大, 绿洲也不能过度扩张, 要以水资源的承载能力为限, 因此确定合理的绿洲面积, 优化水系结构, 提高水资源利用效率将成为今后研究的重点。

**关 键 词:** 玛纳斯河流域; 水系结构; Horton 定律; 时空演变; 驱动力

水系是一个具有不同等级的有机整体, 在维系人类生存与发展中起着重要作用<sup>[1]</sup>。近年来, 随着全球气候变暖, 人类活动加剧, 对水系结构演变影响很大, 特别是对于西北干旱区内陆河流, 径流主要依靠冰川融水与降水补给, 对气候变化更敏感<sup>[2–6]</sup>。1958–2006 年以来, 随着玛纳斯河流域灌溉面积和人口的不断增长, 导致流域内水资源消耗加剧, 为了满足维持流域内自然生态系统稳定与经济社会持续发展所消耗的水资源量, 修建了大量的引水、蓄水、输水等水利工程, 因此在自然因素与人类活动的共同耦合作用下, 探讨玛纳斯河流域水系结构的演变过程就显得尤为重要。

水系结构在一定程度上反映了河流的承载能力, 其结构组成与数量关系遵循一定的规律, Horton (1945) 和 Strahler (1952) 验证了自然河流的水系结构组成具有自相似性, 并提出了 Horton 定律和 Strahler 河流分级方法<sup>[7]</sup>。20 世纪 70 年代以来, 国内许多学者对 Horton 定律进行了验证, 并探求与分形理论的内在联系<sup>[8–10]</sup>, 取得了丰硕的成果, 而对于玛纳斯河流域这方面的研究至今仍未见相关报道,

同时在本研究中对玛纳斯流域进行生态功能区划也属首次, 并以此为背景进行水网密度时空变化分析。玛纳斯河流域是新疆屯垦戍边发展起来的典型绿洲, 是天山北坡经济带的重要组成部分, 在新疆经济发展中起着举足轻重的作用, 其以水资源利用为核心的绿洲发展模式在新疆具有典型性和代表性。近 50 年来, 绿洲面积的迅速扩大换来的是一系列生态问题的出现如: 玛纳斯河下游断流、玛纳斯湖干涸、土地沙化和生物多样性降低, 严重干扰了自然状态下流域的水系结构演变过程。因此, 以玛纳斯河流域生态经济功能区划为背景, 加强对流域内水系结构的研究, 揭示驱动其演变的主要因素, 有利于该流域搞好水网规划和生态修复重建工作, 同时也为干旱区内陆河的河流整治和水系保护提供科学指导和示范作用。

## 1 研究区概况与数据处理

### 1.1 研究区概况

玛纳斯河流域发源于天山北麓, 准噶尔盆地南

收稿日期: 2010-01; 修订日期: 2010-05.

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2007BAC17B01)。

作者简介: 凌红波(1983–), 男, 河南商丘人, 博士, 主要从事生态水文研究。E-mail: linghongbo0929@163.com.

通讯作者: 徐海量(1971–), 男, 江苏宝应人, 博士, 副研究员, 主要从事干旱区生态环境研究。E-mail: xuhl@ms.xjb.ac.cn.

缘,地理位置位于  $43^{\circ}5' \sim 45^{\circ}58'N, 84^{\circ}42' \sim 86^{\circ}33'E$  (图 1)。径流主要依赖于冰川融化和降水补给,水循环在独立的水系内进行,并且在山区形成径流,在平原区消耗与转化。流域处于欧亚大陆腹地,是天山北坡经济带的核心区域,并由从东至西塔西河、玛纳斯河、宁家河、金沟河及其相连的 5 片冲积洪积扇组成。其中,玛纳斯河是准葛尔盆地南缘最大的河流,全长 400 km,年均径流量  $12.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,河流源头发源于和静县境内海拔 5000 m 以上的永久冰川地带,注入准噶尔盆地西北部的玛纳斯湖<sup>[1]</sup>。玛纳斯河流域属温带大陆性干旱气候区,降水量时空差异较大,年均降水量 115~200 mm,年均蒸发量 1500~2100 mm,年均气温  $4.7 \sim 5.7^{\circ}\text{C}$ <sup>[12]</sup>。玛纳斯河流域绿洲是天山北麓最大的人工绿洲,又是新老绿洲聚集地,工农、城乡结合协调发展<sup>[12~13]</sup>。

1.2 数据来源及处理

由于玛纳斯河流域绿洲在近 50 年来迅速扩大,特别在 50、70、80 年代,而进入 21 世纪后绿洲扩展速度有所减缓,导致水系结构在人类干扰下发生显著变化。为探讨水系结构在上述 4 个时期的变化状况,本研究采用的遥感数据采用 1958 年的航片、1976 年的 MSS 影像 (美国马里兰大学免费影像)、1987 年的美国陆地卫星 TM 影像以及 2006 年的 CBERS 影像进行分析研究。对于 1976 年的 MSS 影像采取 4、2、1 波段假彩色合成,1987、2006 年的遥感影像采用 4、3、2 波段假彩色合成。考虑到 1976 年的 MSS 影像和 50 年代的航片有限,一年的影像不能覆盖整个玛纳斯河流域,所以采用 26 幅研究区的 1:10 万地形图的行政边界对影像进行一定的掩模提取和修正。4 个时期的遥感影像在 ERDAS IMAGINE 9.1, Arc/Info 和 ArcGIS 9.2 的支持下,按照水系分级系统对遥感影像进行目视解译并且数字化、建立拓扑关系,并用野外考察数据对解译结果进行校正,获得研究区水系结构图(图 2)和属性数据,并对相关数据进行分析。

1.3 水系结构参数及计算<sup>[7~9]</sup>

(1) 水系分级 根据斯特拉勒 (Strahler) 法将玛纳斯河流域水系分为 4 级,直接发源于河源的小河为一级水系;两条同级别的水系构成更高级,而两条不同级别的水系汇合取两水系中较高者;依次类推至干流,干流为四级水系。

(2) 水网密度 指单位面积水网总长度,其值用来度量区域水系的多少。公式为:

$$D_d = \frac{\sum l}{A}$$
 (1)

式中:  $D_d$  为水网密度( $\text{km}/\text{km}^2$ );  $l$  为水网总长度( $\text{km}$ );  $A$  为流域面积( $\text{km}^2$ )。

(3) 水系分枝比( $R_b$ )、水系长度比( $R_l$ )和水系分维 ( $D$ ) Horton 等于 1945 年总结关于河流的数据资料,提出了 Horton 定律,主要包括水道数定律和水道长度定律,其公式分别为:

$$N_w = R_b^{(s-w)}$$
 (2)

$$L_w = L_1 R_l^{w-1}$$
 (3)

式中:  $N_w$ 、 $L_w$  为  $w$  级水系的数目和平均长度( $\text{km}$ );  $R_b$  和  $R_l$  为水系的分枝比与长度比;  $L_1$ 、 $s$  分别为第一级水系的平均长度,水系最高级别;对  $N_w$ 、 $L_w$  取对数并与  $w$  进行最小二乘拟合得到直线斜率绝对值指数形式,得到水系分支比( $R_b$ ) 和水系长度比( $R_l$ ):

$$R_x = 10^{k_x \cdot 1}$$
 (4)

式中:  $R_x$  为水系结构参数;  $k_x$  为  $N_w$ 、 $L_w$  取对数并与  $w$  进行直线回归后得到的直线斜率。一般  $R_b$  的值在 3~5 之间,  $R_l$  值在 1.5~3 之间。

水系分维数( $D$ )用来衡量水系的复杂程度,分

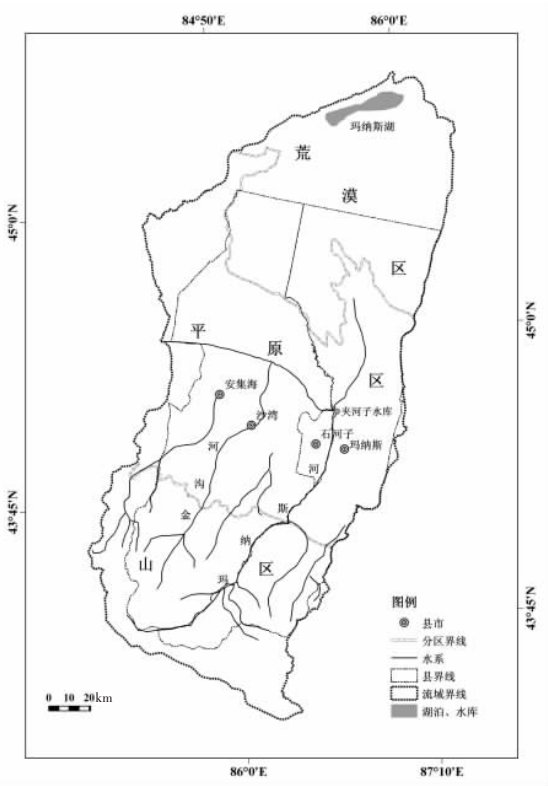


图 1 玛纳斯河流域示意图

Fig.1 Map showing the location of Manas River Basin

维数越大水系越复杂,其值一般在 1.5~2 之间。一般采用 La Barbera 等<sup>[4]</sup>提出的分维数( $D$ )的计算方法,即:

$$D=\frac{\lg R_b}{\lg R_l}$$

(5)

式中: $R_b$ 为水系分支比; $R_l$ 为水系长度比。

## 2 结果与分析

### 2.1 水系长度与水网密度变化

水网密度不仅反映了单位面积上的水系长度,也在一定的程度上显示出水资源对流域内经济社会发展的支撑能力。通过对 1958–2006 年 4 期遥感影像的解译得到了玛纳斯河流域的水系长度和密度的变化(表 1)。玛纳斯河流域 1958–2006 年水系长度出现持续增加,1958–1976 年和 1987–2006 年两个时间段增加速率较大,分别为 32.65 km/a、29.71km/a,增加长度分别为 587.69 km、161.18 km,而 1976–1987 年的速率最小为 14.65 km/a,增加长度为 161.18 km。流域水网密度值较低,1958 年仅为 0.1322 km/km<sup>2</sup>,主要由于在玛纳斯河流域的北部为古尔班通古特沙漠,覆盖流域面积 7436.9 km<sup>2</sup>,占整个流域 22.2%,且无水系分布。

### 2.2 水系分枝比与长度比

20 世纪 50 年代以来,玛纳斯河流域绿洲面积不断扩张,从而导致对水资源的需求不断增大,水系结构发生较大变化,而这种变化是否仍遵循 Horton 定律仍未见相关研究报道。鉴于此,本文给予相关分析和探讨。通过对四期水系的  $w\text{-}\lg N_w$  与  $w\text{-}\lg L_w$  进行最小二乘拟合得到的线性关系明显,且精度较好(四期  $R^2$  皆大于 0.8),同时水网数目和平均长度随水网级别呈几何基数变化(图 3)。利用图 2 拟合的线性斜率,根据公式(4)计算得到了该流域四期的水系分枝比与长度比(表 2)。由表 2 可知,当为最高水系级别 4 时,由于绿洲快速扩张等因素影响增加了水系的分枝比

与长度比,其值分别处于 3–5、1.5~3 之间,符合 Horton 定律。但当水系级别为 2 时,水系的分枝比未能满足,这可能是由于水网级别太少导致线性拟合的斜率失去统计学意义。在 3 级水系时,水系的

表 1 1958–2006 年玛纳斯河流域水系长度、水网密度变化

Tab.1 Length and density change of the streams in Manas River Basin during 1958–2006

玛纳斯河流域	时间/年				变化值		
	1958	1976	1987	2006	1958-1976	1976-1987	1987-2006
水系长度/km	4428.06	5015.75	5176.93	5741.5	587.69	161.18	564.57
水网密度/(km/km <sup>2</sup> )	0.1322	0.1497	0.1546	0.1714	0.0175	0.0049	0.017

表 2 1958–2006 年玛纳斯河流域水系分枝比( $R_b$ )与长度比( $R_l$ )

Tab.2 Bifurcation and length ratios of the streams in Manas River Basin during 1958–2006

水系级别	水系分支比( $R_b$ )				水系长度比( $R_l$ )			
	1958	1976	1987	2006	1958	1976	1987	2006
2	2.41	2.57	2.95	2.97	2.37	2.36	2.47	2.07
3	3.37	3.53	3.73	3.67	1.59	1.65	1.64	1.5
4	3.87	4.09	4.27	4.47	2.09	2.12	2.19	2.204

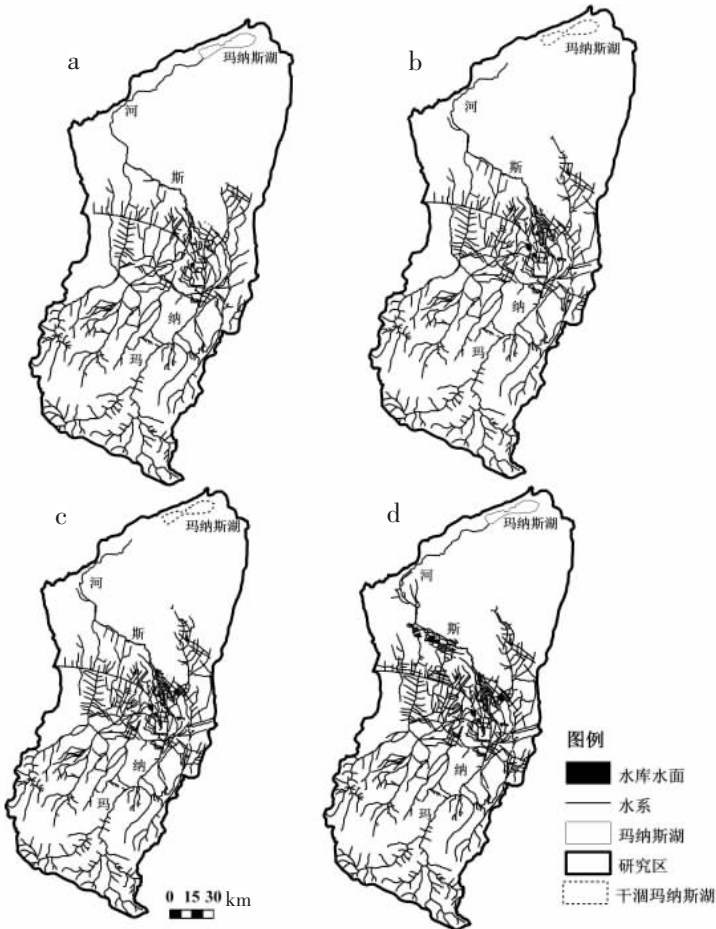


图 2 1958–2006 年玛纳斯河流域水系图

Fig.2 Stream construction of Manas River Basin during 1958 –2006



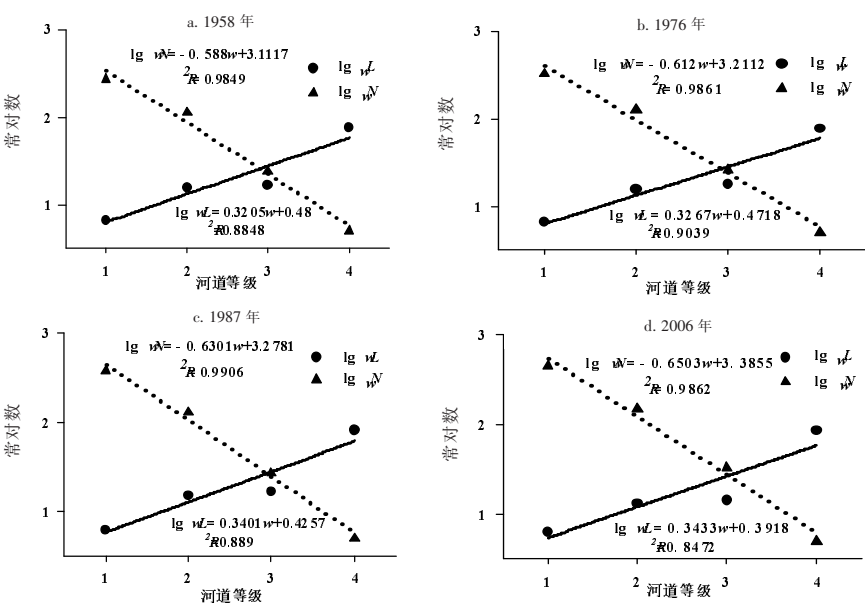


图3 河网水系级别与水网数目、水网平均长度的半对数关系曲线

Fig.3 The semi-log curves between stream order and number, stream order and length  
注:  $w$ : 水网等级;  $\lg N_w$ : 第  $w$  级水网数量的常对数;  $\lg L_w$ : 第  $w$  级水网长度的常对数;  $R^2$ : 相关系数

分枝比与长度比都具有良好的 Horton 表现,但在 1976 年后水系长度比呈减少趋势,而水系分枝比不断增加,反映了水网在数量上的发育状况要优于其长度。

2.3 水系的分维

通过对 1958–2006 年水系分枝比( $R_b$ )与长度比( $R_l$ )进行计算,得到了玛纳斯河流域的水系分维数(表 3)。玛纳斯河流域 1958–2006 年水系分维数皆在 1.5~2 之间,满足 La Barbera 等所证明的范围<sup>[14]</sup>。从变化率来看,1958–1976 年与 1987–2006 年两个时间段的变化率为 0.039、0.043,皆为正数,因此水系结构的复杂化趋势明显,这与一些学者对高度城市化地区水系结构的研究结论相反<sup>[7,9]</sup>,从而说明了该流域城市化进程较慢,程度较低,农业生产一直是其主导产业,这也与流域的实际发展状况相符合。而 1976–1987 年水系长度发育速率高于数量,变化率为负值 0.023,因此呈简单化演变趋势。玛纳斯河流域属大陆性干旱气候,高温少雨,气候干燥,农业的发展主要依赖流域内玛纳斯河、金沟河、巴音沟河、宁家河和塔西河 5 条水系的灌溉,并修建了大量的引水渠道,强烈的人类活动干扰了水系的

自然发育过程。在 2006 年玛纳斯河流域的分维数为 1.895,与其他学者的研究结果相比,高于许多地区的河流水网<sup>[7,9,15]</sup>,同西北黄土高原的纸纺沟(1.9)<sup>[16]</sup>最为接近。

2.4 水网密度的时空变化

2.4.1 生态经济功能分区

利用玛纳斯河流域生态经济功能区划图,按不同的生态经济功能区与水系图进行叠加计算,得到了每个生态经济单元的水网密度值(图 4)。在玛纳斯河流域进行生态经济功能区划尚属首次,利用生态经济功能区划图为基础图进行水网密度时空分析,主要考虑到该流域位于温带荒漠区,水资源在维持生态平衡与支撑经济发展中起着至关重要的作用,

因此明确不同生态经济单元的水系分别状况,对搞好水资源的合理配置,优化水系结构,做好生态环境保护,实现社会经济持续发展具有重要意义。

根据生态经济功能区划原则、依据及分区命名方法<sup>[17–19]</sup>,结合玛纳斯河流域自身特点,将其划分为 3 个一级分区和 9 个二级区,并在图中以不同的数值代表不同的属性给予标识(图 3)。

(1)南部天山草原森林牧林矿产业区

该区包括:  $I_1$  依连哈比尔尕山中高山牧林径流形成亚区;  $I_2$  塔西河—东湾—西戈壁低山宽谷牧农水土保持亚区。

(2)中部玛纳斯河平原农业绿洲与城镇绿洲区

包括:  $II_1$  玛纳斯—石河子—沙湾冲积扇城镇绿洲与农业绿洲污染防治亚区;  $II_2$  十户滩—安集海扇缘带农业绿洲盐渍化防治亚区;  $II_3$  莫索湾干三角农业绿洲防风固沙亚区;  $II_4$  下野地冲积平原、干三角洲农业绿洲盐渍化与沙漠化防治亚区。

(3)北部古尔班通古特沙漠生态保育沙产业区

该区包括:  $III_1$  莫索湾走廊两侧人工恢复沙漠植被沙产业亚区;  $III_2$  莫索湾北部自然恢复沙漠植被油气资源勘探开发亚区;  $III_3$  玛纳斯河下游及湖盆自然植被保育恢复盐业亚区。

2.4.2 基于生态经济功能分区的水网密度时空变化

在时间尺度上,1958–2006 年  $III_1$ 、 $III_2$ (以属性值代表生态经济功能分区名称,下同)生态经济单元

表 3 1958–2006 年玛纳斯河流域水系分维

Tab.3 Fractal dimensions of stream in Manas River Basin during 1958–2006

玛纳斯	时间/年				变化率/%		
河流域	1958	1976	1987	2006	1958-1976	1976-1987	1987-2006
分维	1.836	1.875	1.852	1.895	0.039	-0.023	0.043

的水网密度接近于 0, 几乎无水系分布, 这主要是因为该区为古尔班通古特沙漠的一部分, 气候干燥, 蒸发量大且距离水网较远, 引水困难。I<sub>1</sub> 位于南部源流山区, 5 条干流和支流的数目及长度在 1958–2006 年保持恒定, 水网密度皆无变化且值较小。4 个时期的水网密度均维持在 0.1678 km/km<sup>2</sup>, 在一定程度上反映了该区水系结构稳定, 受人类活动影响相对较小。其余生态经济单元类型除属性 II<sub>1</sub>, III<sub>3</sub> 分别在 1976–1987 年, 1958–1976 年出现减小外, 其他皆呈增加趋势。综合图 3 可以看出, 1958–2006 年, I<sub>1</sub>、III<sub>1</sub>、III<sub>2</sub>、III<sub>3</sub> 的生态经济单元类型水网密度皆没有发生变化, 而 II<sub>4</sub> 增加最大, 增加了 0.1547 km/km<sup>2</sup>, 其他依次为属性 II<sub>3</sub> (0.1237 km/km<sup>2</sup>)、II<sub>2</sub> (0.0838 km/km<sup>2</sup>)、II<sub>1</sub> (0.0673 km/km<sup>2</sup>)、I<sub>2</sub> (0.0128 km/km<sup>2</sup>), 表现为由下野地冲积平原和干三角洲农业绿洲向南部山区逐渐减小, 而北部的荒漠区几乎无水系分布, 这种趋势是由不同生态经济单元自然生态环境类型、社会经济发展状况, 综合发展需求及生态修复重建等方面共同决定。

从空间尺度看, 以 2006 年为例进行现状分析, 北部古尔班通古特沙漠生态保育沙产业区水网密度极低, 除 III<sub>3</sub> 有较少水系分布外, 其他两个生态经济单元几乎无水系引入, 生态环境十分脆弱。玛纳斯湖位于 III<sub>3</sub> 的生态经济单元, 由于玛纳斯河上游拦坝建库, 中游绿洲面积扩大, 致使玛纳斯湖在 1976、1987 年皆出现干涸(图 2), 但在 1999 年玛纳斯河肯斯瓦特水文站出现 1095 m<sup>3</sup>/s 的历史最大洪峰, 年径流量也达到最大 18.27×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>, 上游因水量较大而导致水库崩坝, 大量洪水注入玛纳斯湖, 使其至 2006 年一直有水体分布, 而此时的水网密度也有所增加。

中部玛纳斯河平原农业绿洲与城镇绿洲(包括属性 II<sub>1</sub>、II<sub>2</sub>、II<sub>3</sub>、II<sub>4</sub>)是玛纳斯河流域水资源的主要消耗与转化区, 水网密度最高, 也是天山北坡最大的人工绿洲。II<sub>1</sub> 依靠发达的交通, 较高的城市化与工业化水平, 形成了流域的沿路绿洲经济带。该生态经济单元水网密度为 0.6398 km/km<sup>2</sup>, 水网最为密集, 这是由于该区人口密集, 工业发达, 仅依靠地下水远不能满足城市及农业生产用水。据统计该区已超采地下水 3.38×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>, 致使地下水位以 0.5~1.0 m/a 的速度下降, 因此仍需引入一部分地表水予以补充。

II<sub>2</sub> 的水网密度 0.4203 km/km<sup>2</sup>, 仅次于 II<sub>1</sub>, 是

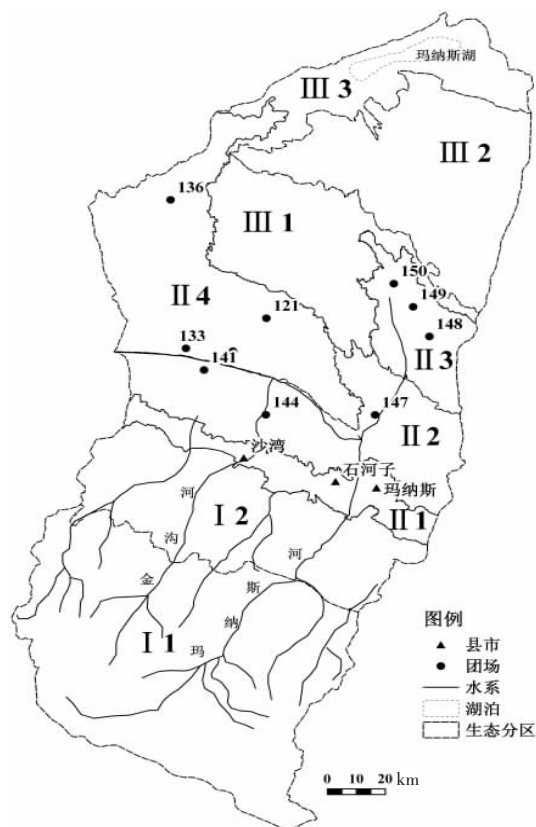


图 4 玛纳斯河流域生态经济功能区

Fig.4 The ecological and economic divisions in Manas River Basin

由流域 5 条干流冲积扇下部扇缘溢出带连结而成。该区水库较多, 包括大泉沟、蘑菇湖等 26 座, 总库容 5.2×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>, 并以此为水源基地向四周辐射, 修建了大量的农田灌溉渠道。另外, 该区盐渍化严重, 盐渍化耕地面积占总耕地面积的 52%, 因此修建了许多排渠进行洗盐。引、输、配等一系列水利工程配套构成了该区错综复杂的水系结构。

II<sub>3</sub> 的水网密度在绿洲区最低, 只有 0.2839 km/km<sup>2</sup>, 农八师 148、149 及 150 团 3 个农场坐落于此, 其西北部深入古尔班通古特沙漠, 气候干燥, 灌溉水源主要来自从玛纳斯河引水的东岸大渠。该区由于引入地表水较少, 因此农业灌溉、生产生活用水多抽取地下水, 造成地下水埋深下降到 8~12m 以下, 对于该区防护林建设造成极大困难。

II<sub>4</sub> 由玛纳斯河中游冲积平原及清水河、巴音沟河等小河流干三角洲构成。南为东西向的玛河西岸大渠, 北部毗邻古尔班通古特沙漠, 水网密度在绿洲区仅高于 II<sub>3</sub>, 为 0.32 km/km<sup>2</sup>。与属性 II<sub>3</sub> 相似, 防风固沙是其工作重心, 并加强北部对例如梭梭等沙漠植被的保护, 禁止毁林开荒与过度打井。

南部天山草原森林牧林矿产区水网密度高于北部荒漠区而低于中部绿洲，主要是由于该区 3、4 级水系较多，且区域面积较大，为  $1.308\times 10^4\text{ km}^2$ ，占整个流域的 39.1%，两个亚区  $I_1$ 、 $I_2$  的水网密度分别为  $0.1678\text{ km/km}^2$  和  $0.2183\text{ km/km}^2$ 。该区主要为流域源流山区，区域年降水总量达到  $34.9\times 10^8\text{ m}^3$ ，其中 65.6% 汇入流域径流，为中下游绿洲发展提供丰沛水量。

### 3 驱动机制分析

#### 3.1 地表水资源量对水网变化的驱动分析

地表水资源量是水系结构得以存在与发育的内在因素，充足的水资源量才能为水系的成熟发育和水网密度的增加提供可能。以流域内两主要河流玛纳斯河(1956–200 年)、金沟河(1962–2006 年)为代表，结合流域内降水量时间序列，利用非参数 Mann–Kendall 单调趋势检验(1956–2006 年)，得到近 50 年来玛纳斯河流域两主要河流来水量与降水量的变化趋势(表 4)。在 Mann–Kendall 单调趋势检验中，原假设  $H_0$  表示时间序列的增加或减少趋势不显著，而备择假设  $H_1$  则表示时间序列发生了显著的趋势变化；倾斜度  $\beta$  值表示待测序列在单位时间内的变化量。

从表 4 可以看出，玛纳斯河、金沟河与降水量的 Mann–Kendall 检验统计量  $Z_c$  值分别为 2.478、2.348、2.217，皆大于 1.96(0.05 显著水平下，检验统计量  $Z_{0.05}=1.96$ )，上升趋势显著。从倾斜度  $\beta$  值可以看出，玛纳斯河与金沟河的年均径流量分别增加了  $4.7\times 10^6\text{ m}^3/\text{a}$  和  $1.1\times 10^6\text{ m}^3/\text{a}$ ，降水量  $0.967\text{ mm/a}$ ，为流域水网发育提供了丰沛水源，保障水网密度与水系长度呈持续增加走势(表 1)。

#### 3.2 人类活动对水系结构的驱动分析

近 50 年来，玛纳斯河流域耕地面积与绿洲面积不断增加(图 5a)，大规模的水土资源开发与人口快速增长(图 5b)等剧烈的人类活动是导致其水系结构演变的主要外在驱动因素。在图 5a 中，1958–1976 年耕地增长率  $28.33\text{ km}^2/\text{a}$ ，1976 年后进一步加快，在 1976–1987 年达到最大值  $123.5\text{ km}^2/\text{a}$ ，1987–2006 年有所减缓，速率为  $120.36\text{ km}^2/\text{a}$ ，同时 1958–2006 年耕地增加量达到  $3928.72\text{ km}^2$ 。绿洲的变化趋势与耕地较为一致，在 1976–1987 年呈现最大增长率  $145.98\text{ km}^2/\text{a}$ ，与 1958 年相比，2006 年绿洲扩张了  $4239.24\text{ km}^2$ 。水是支撑绿洲生存与发展的基础，2006 年耕地、绿洲面积比 1958 年增加 2 倍，给流域水资源构成巨大压力，开渠引水势在必行，加速了水系的发育与水网密度的提高。在图 5b 中，虽然缺少 1974 年之前的统计数据，但在 1975 年流域人口为  $75.46\times 10^4$  人，1949–1976 年的年增长率为  $2.64\times 10^4$  人/a，增加量较大，增长趋势明显。至 2006 年，全流域人口增加到  $98.1\times 10^4$  人，为 1949 年的 14.2 倍。人口的快速增长，必然导致绿洲、耕地面积扩大，水资源消耗加剧。据计算，流域现已引用可利用地表水资源量的 98%，泉水利用殆尽，地下水开采  $7.29\times 10^8\text{ m}^3$ ，占可开采量的 58%。由此可见，流域水资源开采潜力已不容乐观，很难支撑流域绿洲的进一步

表 4 玛纳斯河流域两源流径流及降水量变化  
Tab.4 Variation of runoff and precipitation in Manas River Basin

河流与降水量	时间序列	平均值	$\beta$	$Z_c$	$H_0$	趋势
玛纳斯河 / $10^8\text{ m}^3$	1956-2007	12.41	0.047	2.478	拒绝	显著 上升
金沟河 / $10^8\text{ m}^3$	1962-2007	3.087	0.011	2.348	拒绝	显著 上升
降水量 /mm	1956-2007	177.883	0.967	2.217	拒绝	显著 上升

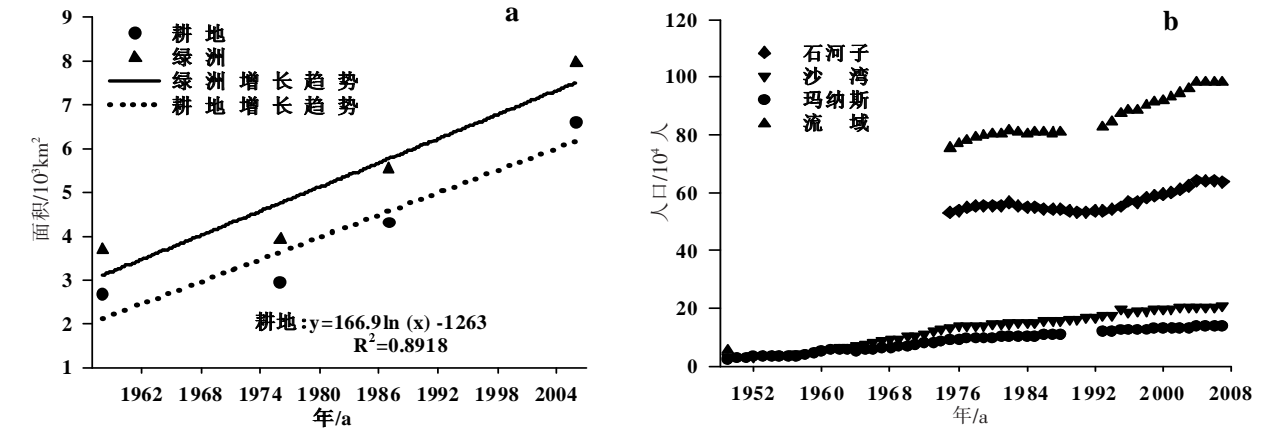


图 5 1958–2006 年玛纳斯河流域耕地、绿洲与人口变化  
Fig.5 Changes of cultivated land, oasis and population in Manas catchment during 1958–2006



扩张。因此,为实现绿洲的可持续发展,应进一步探讨确定现有的水资源量所能承载的合理的绿洲面积,而化水系结构、提高水资源利用效率、实现水资源合理配置应是工作之重。

## 4 结论

近 50 年来, 玛纳斯河流域人口与绿洲面积不断增加,为了满足流域内生产、生态与生活等用水,修建了大量灌溉渠道,同时流域内径流量与降水量均有所升高,致使其水系结构在人类活动与自然因素的综合干扰下发生演变,研究结果如下:

(1) 1958–2006 年绿洲面积不断扩大化下的玛纳斯河流域水网具有很好的 Horton 表现,水系结构参数满足河流的一般特征,水网密度、水系长度比、分枝比和分维等参数遵循 Horton 定律。玛纳斯河流域的水网数目及水网平均长度随水网级别呈几何级数变化,也表明了不同等级的水系发育具有自相似性。1958、1976、1987 和 2006 年 4 个时期的分维数大体呈增加走势且数值较大,其水系向复杂化演变的趋势明显。

(2) 1958–2006 年水网密度不断增加且绿洲地区高于南部源流山区与北部荒漠区。水网密度的高低是由当地的自然生态环境与气候条件、社会经济状况与发展需求等因素共同决定的。

(3) 水资源是水系结构演变的基本要素,充足的水资源量是水系结构发育成熟的关键。经过 Mann–Kendall 非参数检验,近 50 年来流域内降水量和玛纳斯河、金沟河径流量不断增加,是玛纳斯河流域水系长度与水网密度的持续增加的自然驱动力。玛纳斯河流域是新疆典型的灌溉农业区,近 50 年来人口数量、绿洲与耕地面积皆增加迅速并且对水资源依赖性很强,是导致水系结构演变的主要因素。流域水资源量增加是驱动其水系结构演变的主要内因,而由人类活动所导致的绿洲与耕地面积变化是其重要外因,二者耦合决定了流域水系结构演变的速率与方向。

(4) 玛纳斯河流域绿洲的发展规模要控制在水资源的承载能力范围之内,绿洲规模过大,将促使水资源消耗加剧,生态环境逐步恶化,加速荒漠对绿洲的侵蚀,最终将导致水域面积缩小,水网密度降低,水系长度变短等一系列不可持续的状况愈演愈烈;然而绿洲规模较小则不能充分、高效的利用其水、土等自然资源,对维持脆弱的绿洲生态系统

稳定及生态安全也极为不利,因此确定绿洲适宜的发展规模,优化其水系结构,提高水资源的利用效率将成为今后研究的重点。

## 参考文献

[1] 孟飞, 刘敏, 吴健平, 等. 高强度人类活动下河网水系时空变化分析:以浦东新区为例. 资源科学, 2005, 27(6): 156–161.

[2] 贺建桥, 宋高举, 蒋熹, 等. 2006 年黑河水系典型流域冰川融水径流与出山径流的关系. 中国沙漠, 2008, 28(6): 1186–1189.

[3] 辛 渝, 崔彩霞, 张广兴, 等. 博州不同级别降水及极端降水事件的时空变化. 中国沙漠, 2008, 28(2):362–369.

[4] 王鹏祥, 杨金虎. 中国西北近 45a 来极端高温事件及其对区域性变暖的响应. 中国沙漠, 2007, 27(4):649–655.

[5] 蓝永超, 丁永建, 刘进琪, 等. 全球气候变暖情景下黑河山区流域水资源的变化. 中国沙漠, 2005, 25(6):863–868.

[6] 贾文雄, 何元庆, 李宗省, 等. 祁连山及河西走廊气候变化的时空分布特征. 中国沙漠, 2008, 28(6): 1151–1155.

[7] 黄奕龙, 王仰麟, 刘珍环, 等. 快速城市化地区水系结构变化特征: 以深圳市为例. 地理研究, 2008, 27(5): 1212–1220.

[8] 龚家栋, 李吉均. 黑河上游水系发育特征分析. 中国沙漠, 2000, 20(4): 389–392.

[9] 杨 凯, 袁雯, 赵军, 等. 感潮河网地区水系结构特征及城市化响应. 地理学报, 2004, 59(4): 557–564.

[10] 韩昌来, 毛锐. 太湖水系结构特点及其功能的变化. 湖泊科学, 1997, 9(4): 300–306.

[11] 李义玲, 乔木, 杨小林, 等. 干旱区典型流域近 30a 土地利用/ 覆被变化和景观破碎化分析: 以玛纳斯河流域为例. 中国沙漠, 2008, 28(6): 1050–1057.

[12] 李俊峰, 叶茂, 范文波, 等. 玛纳斯河流域生态与环境需水研究. 干旱区资源与环境, 2006, 20(6): 9–14.

[13] 张风华, 赵强, 潘旭东, 等. 新疆玛河流域绿洲土壤特性空间分异与合理开发模式. 水土保持学报, 2005, 19(6): 53–56.

[14] La Barbera P, Rosso R. Fractal geometry of river networks. Eos Trans., Am. Geophys. Union, 1987, 68(44):1276.

[15] 冯平, 冯焱. 河流形态特征的分维计算方法. 地理学报, 1997, 52(4):324–330.

[16] 雷会珠, 武春龙. 黄土高原分形沟网研究. 山地学报, 2001, 19(5): 474–477.

[17] 董锁成, 张小军, 王传胜. 中国西部生态—经济区的主要特征与症结. 资源科学, 2005, 27(6): 103–111.

[18] 包晓斌. 流域生态经济区划的应用研究. 自然资源, 1997(5): 8–13.

[19] 新疆生态功能区划编委会. 新疆生态功能区划. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2005: 54–58.

# Temporal–spatial Evolution of Stream Construction and Its Driving Forces in Manas River Basin During 1958–2006

LING Hongbo<sup>1,2</sup>, XU Hailiang<sup>1</sup>, QIAO Mu<sup>1</sup>, FAN Zili<sup>1</sup>, SHI Wei<sup>1,2</sup>, ZHANG Qingqing<sup>1,2</sup>

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** This paper analyzes dynamic changes of length, density, branching ratio, length ratio and fractal dimension of the river networks and their driving factors based on the visual interpretation of remote sensing image of Manas River Basin during 1958, 1976, 1987 and 2006 by using the software of Arc/Info. In the results, the changes of the river networks obey Horton’s law, with geometric changes of stream number and average length and with continuous increase of river density, length ratio and branching ratio. River density of oases in the basin is higher than that in the southern mountainous areas and the northern deserts. This is determined by the eco–environment, social–economic, synconditions, integrated development and ecological restoration in those areas. The increase of water quantity, population, and areas of cultivated lands and oases are the main driving factors. The expansion of cultivated land and oases is limited by water carrying capacity, therefore, it will become the key tasks to make rational plans for oases, to optimize river system structure and to improve water use efficiency.

**Key words:** Manas River Basin; structure of river system; Horton law; temporal–spatial dynamics; driving factor

本文引用格式：  
凌红波, 徐海量, 乔木, 等. 1958–2006 年玛纳斯河流域水系结构时空演变及驱动机制分析. 地理科学进展, 2010, 29(9): 1129–1136.