

文章编号:1003-7578(2005)01-001-06

黄河流域地表水资源可再生性评价*

李春晖 杨志峰

(北京师范大学环境学院 北京 100875)

提 要:水资源具有自然再生和社会再生、水量再生和水质恢复等四种类型。本文根据水资源可再生性基本涵义建立了黄河流域地表水资源可再生性评价一般指标体系,并运用 TOPSIS 法进行评价,结果表明:黄河流域主要产水区域如龙羊峡以上、湟水流域、洮河流域和渭河流域等都是水资源可再生性相对最强或较强的区域,北洛河流域是最弱的区域,其余属于中等或者较弱区域。

关键词:水资源可再生性; TOPSIS; 评价; 黄河流域

中图分类号: TV213

文献标志码: A

黄河流域处于我国半干旱半湿润地区,多年平均降水量在 200~600mm 之间、年天然径流量 580 亿 m^3 ,流域人均水资源占有量仅为全国人均的四分之一,单位耕地面积水资源量不足全国的五分之一,水资源短缺十分严重。随着国民经济和社会迅速发展,流域下垫面产流条件改变,水资源情势发生了很大变化,出现供水矛盾加剧、生态环境恶化、下游河段多年严重断流等局面^[1-2]。水资源是一种可再生资源,其可再生性由自然循环和社会循环决定的,对流域水资源可再生性进行合理评价是流域水资源合理利用的基础和生态环境保护的根本,目前很多学者对此进行了理论探讨和实例研究^[3-7],但是目前还没有形成统一的理论和方法体系。本文则根据地表水资源可再生性的基本涵义,建立了黄河流域地表水资源可再生性评价指标体系,并采用 TOPSIS 法进行评价。

1 地表水资源可再生性

水资源可再生性是水资源的基本特性之一,其基本涵义是“水资源通过天然作用或者人工经营能为人类反复利用的特性”^[8-11],也就是说水资源可再生性是水资源通过自然循环和社会循环使水量不断得到更新补充及水质得到恢复的特性和能力,它是一个综合的概念。从内涵上讲分为广义再生和狭义再生,前者是指自然的水量再生和水质恢复与社会的水量再生与水质恢复;后者仅指传统意义上的水量自然可再生^[12]。其中地表水资源的这种可再生特性和能力称为地表水资源的可再生性。

从水资源可再生性涵义可知,从性质上,地表水资源可再生分为水质恢复和水量再生。水质恢复包括自然净化引起的水质恢复和人工处理净化的水质恢复;水量再生包括自然循环的水资源量再生和社会循环(如污水处理增加可使用量形式)的水资源量再生。自然再生的水量是地表再生水资源的主体。从属性上,地表水资源可再生的分为自然再生和社会再生,前者通过自然循环得到,后者通过社会循环得到。地表水资源可再生的水量再生和水质恢复、自然再生和社会再生相互交叉相互联

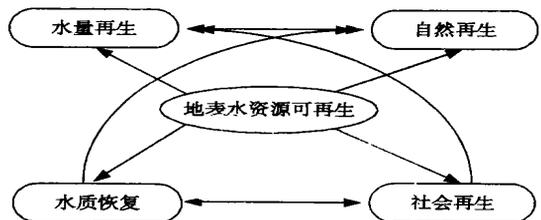


图 1 地表水资源可再生类型结构图

Fig. 1 Renewable types of surface water resources

* 收稿日期: 2003-12-23

基金项目: 国家重点基础研究规划项目(G1999043605)

作者简介: 李春晖(1976-),男,安徽阜阳人,博士后,主要从事水资源水环境评价研究。Email: chunhui@263.net

系,构成一个耦合系统(图 1)^[12]。例如水资源水量再生与水质恢复有着密切联系,水量再生与水质恢复往往同时进行,水质恶化必然导致可利用水量的减少。

2 评价指标体系、标准与评价分区

2.1 评价指标体系建立

流域地表水资源可再生性综合评价指标体系建立可以从两个角度考虑,从再生的性质看,水资源可再生由水质恢复和水量再生两部分构成;从再生的属性看,水资源可再生分为自然再生和社会再生两类。本文仅从自然再生和社会再生角度建立黄河流域地表水资源可再生性综合评价指标体系。根据科学性、完备性、可操作性、主导型、独立性、区域性和指标数据可得性等原则建立了黄河流域地表水资源可再生性评价指标体系,力求全面反映地表水资源可再生性的主要特征。评价指标体系见表 1。

表 1 黄河流域地表水资源可再生性评价指标体系和权重

Tab. 1 Indices system and weights for assessment of renewability of surface water in the Yellow River Basin

总目标层	次目标层 (权重)	指标层	涵义	权重 (相对于中间目标层)	权重 (相对于总目标层)
黄河流域地表水资源可再生性	自然再生能力 (0.7)	降水量(mm)	反映地表再生来源大小	0.244	0.1708
		径流系数	反映地表水资源再生过程强弱	0.136	0.0952
		径流深(mm)	反映单位面积再生能力	0.136	0.0952
		天然径流量(亿 m ³)	反映水资源自然再生量	0.403	0.2821
		水质现状	反映影响水质自然恢复的大小	0.079	0.0553
	社会再生能力 (0.3)	万元产值工业地表水用量(万元/m ³)	反映用水/节水效率	0.088	0.0264
		万元产值农业用水量(万元/m ³)		0.073	0.0219
		农田灌溉单位面积地表水用量(m ³ /亩)		0.073	0.0219
		万元产值废水排放量(m ³ /万元)	反映废水排放水平	0.090	0.027
		单位面积废水排放量(万 m ³ /km ²)		0.090	0.027
		城市水资源重复利用率(%)	反映城市污水处理能力	0.057	0.0171
		污水达标排放率(%)		0.057	0.0171
		工业废水治理率(%)		0.057	0.0171
		工业废水治理达标率(%)		0.057	0.0171
		城市污水处理率(%)		0.057	0.0171
		城市污水处理达标率(%)		0.057	0.0171
		人均国民生产总值(万元/人)		0.122	0.0366
		国民生产总值(亿元)	0.122	0.0366	

该指标体系既能反映各区域水资源可再生性的单位再生能力又能反映区域整体再生水平,总体上可以较好地对各区域地表水资源可再生性进行评价。

表 2 黄河流域地表水资源可再生性评价标准

Tab. 2 Assessment criterions of surface water renewability in the Yellow River Basin

	单位	级(最强)	级(较强)	级(中等)	级(较弱)	级(最弱)
降水量	mm	> 1500	1500 ~ 1000	1000 ~ 500	500 ~ 100	100 ~ 0
年地表径流系数		> 0.5	0.5 ~ 0.4	0.4 ~ 0.3	0.3 ~ 0.2	0.2 ~ 0
年地表径流深	mm	> 600	600 ~ 400	400 ~ 200	200 ~ 50	50 ~ 0
天然径流量	亿 m ³	> 100	100 ~ 50	50 ~ 20	20 ~ 10	10 ~ 0
水质现状		1 ~ 2	3	4	5	6
万元工业产值地表水用量	m ³ /万元	0 ~ 50	50 ~ 200	200 ~ 400	400 ~ 800	> 800
万元产值农业用水量	m ³ /万元	0 ~ 100	100 ~ 400	400 ~ 600	600 ~ 1000	> 1000
农田灌溉单位面积地表水使用量	m ³ /亩	0 ~ 100	100 ~ 300	300 ~ 500	500 ~ 800	> 800
万元产值废水排放量	m ³ /万元	0 ~ 50	50 ~ 100	100 ~ 200	200 ~ 400	> 400
单位面积废水排放量	万 m ³ /km ²	0 ~ 0.2	0.2 ~ 0.4	0.4 ~ 0.8	0.8 ~ 1.2	> 1.2
水资源重复利用率	%	100 ~ 80	80 ~ 60	60 ~ 40	40 ~ 20	20 ~ 0
废水达标排放率	%	100 ~ 80	80 ~ 60	60 ~ 40	40 ~ 20	20 ~ 0
工业废水治理率	%	100 ~ 80	80 ~ 60	60 ~ 40	40 ~ 20	20 ~ 0
工业废水治理达标率	%	100 ~ 80	80 ~ 60	60 ~ 40	40 ~ 20	20 ~ 0
城市污水处理率	%	100 ~ 80	80 ~ 60	60 ~ 40	40 ~ 20	20 ~ 0
城市污水达标率	%	100 ~ 80	80 ~ 60	60 ~ 40	40 ~ 20	20 ~ 0
人均国内生产总值	万元/人	> 1.0	1.0 ~ 0.8	0.8 ~ 0.6	0.6 ~ 0.4	0.4 ~ 0
国内生产总值	亿元	> 1000	1000 ~ 800	800 ~ 600	600 ~ 200	200 ~ 0

2.2 评价标准

根据黄河流域统计数据并参考全国其它流域数据得到各指标评价分级标准。这里采用五级标准,一级表示地表水资源可再生性最强,五级表示最差,其余介于最差和最强之间。各指标标准见表 2。

2.3 评价分区

根据黄河流域水资源条件的区域差异和河流体系的完整性,本文把黄河流域划分为 15 个区域(不含内流区)(图 2),并把整个黄河流域作为一个区域,共 16 个区域,分别评价各分区地表水资源的可再生性。

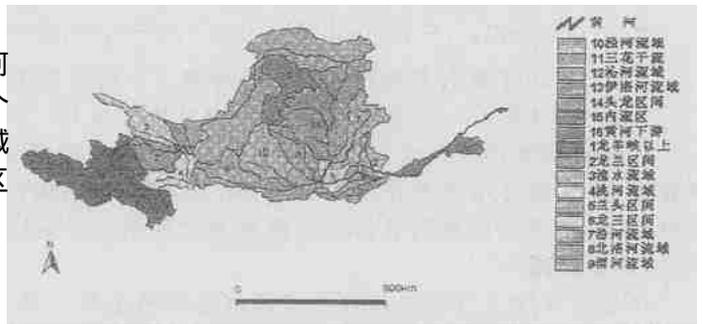


图 2 黄河流域水资源评价分区图

Fig. 2 Sub - regions of the Yellow River Basin for water resources assessment

3 评价方法与结果

3.1 TOPSIS 法

(1)原理

TOPSIS 法 是 Technique for Order

Preference by Similarity to Ideal Solution 的缩写,即逼近于理想解的技术。它是一种基于理想点的决策方法^[13-14],其基本思路是定义决策问题的理想解和负理想解,然后在可行方案中找到一个方案,使其距理想解的距离最近,而距负理想解的距离最远。理想解一般是设想最好的方案,它所对应的各个属性至少达到各个方案中的最好值;负理想解是假定最坏的方案,其对应的各个属性至少不优于各个方案中的最劣值。方案排队的决策规则,是把实际可行解与理想解和负理想解作比较,若某个可行解最靠近理想解,同时又最远离负理想解,则此解是方案集的满意解。

(2)距离的测度

为了度量可行方案靠近理想解和远离理想解的程度,需要采用一定的距离测度,本文采用相对接近测度。设决策问题有 m 个目标 f_j , n 个可行方案 X_i ; 并设该问题的规范化加权目标的理想点是 Z^* , $Z^* = (Z_1^*, Z_2^*, \dots, Z_m^*)^T$, 那么用欧几里得范数作为距离的测度, 则从任意可行点到 Z^* 的距离为:

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^m (Z_{ij} - Z_j^*)^2}, \quad i = 1, \dots, n \quad j = 1, 2, \dots, m \tag{1}$$

式中, Z_{ij} 为第 j 个目标对第 i 个方案的规范化加权值。

同理, 设 $Z^- = (Z_1^-, Z_2^-, \dots, Z_m^-)^T$, 则任意解到负理想解之间的距离为:

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (Z_{ij} - Z_j^-)^2}, \quad i = 1, \dots, n \quad j = 1, 2, \dots, m \tag{2}$$

那么, 某一可行解对于理想解的相对接近度定义为:

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^*}, \quad 0 \leq C_i^* \leq 1 \quad i = 1, \dots, n \tag{3}$$

于是, 若 X_i 是理想解, 则相应的 $C_i^* = 1$; 若 X_i 是负理想解, 则相应的 $C_i^* = 0$ 。 X_i 愈靠近理想解, C_i^* 愈接近于 1; 反之, 愈接近负理想解, C_i^* 愈接近于 0。那么, 可以对所有的 C_i^* 进行排队, 以求出满意解。

(3)计算步骤

第一步: 设某一决策问题, 其决策矩阵为 A。由 A 可以构成规范化的决策矩阵 Z, 其元素为 Z_{ij} , 且有

$$Z_{ij} = f_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^n f_{ij}^2}, \quad i = 1, \dots, n \quad j = 1, 2, \dots, m \tag{4}$$

式中, f_{ij} 由决策矩阵 A 给出。

$$A = \begin{array}{cccc|c} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1m} & X_1 \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2m} & X_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_{n1} & f_{n2} & \dots & f_{nm} & X_n \end{array} \tag{5}$$

第二步: 构造规范化的加权决策矩阵 Z, 其元素 Z_{ij} :

$$Z_{ij} = W_j Z_{ij}, \quad i = 1, \dots, n \quad j = 1, 2, \dots, m \tag{6}$$

其中 W_j 为第 j 个目标的权。

第三步:确定理想解和负理想解。设 J 代表效益型目标集, J' 代表成本型目标集,有

$$Z^+ = \{(\max_{j \in J} Z_{ij} / j \in J), (\min_{j \in J'} Z_{ij} / j \in J') / i = 1, \dots, n\} = \{Z_1^+, Z_2^+, \dots, Z_m^+\}$$

$$Z^- = \{(\max_{j \in J'} Z_{ij} / j \in J'), (\min_{j \in J} Z_{ij} / j \in J) / i = 1, \dots, n\} = \{Z_1^-, Z_2^-, \dots, Z_m^-\} \quad (7)$$

第四步:计算每个方案到理想点的距离 S_i^+ 和到负理想点的距离 S_i^- 。

第五步:计算 C_i^+ , 并按每个方案的相对接近度 C_i^+ 的大小排序, 找出满意解。

这种决策理论和方法可以引入到综合评价中, 而且可以得到满意的结果, 如环境质量评价^[15]。在本研究中, 把 5 级标准值看作 5 个方案, 与 16 个评价区域指标构成 21 个决策方案, 利用 TOPSIS 法对这 21 个方案排序, 便可以得到各区与 5 级标准之间的关系, 从而确定各区域可再生性评价等级。

3.2 评价结果

这里仅评价黄河流域地表水资源综合可再生性。把 5 级评价标准值(下限)和 16 个评价区域指标构成决策矩阵, 采用相对距离测度法得到规范化矩阵。利用层次分析法(AHP)得到各指标权重(见表 1), 根据 TOPSIS 计算步骤得到理想解、负理想解(表 3)。

表 3 各指标理想解和负理想解

Tab. 3 Ideal solutions and negative ideal solutions of all indices

指 标	降水量	年地表径流系数	年径流深	天然径流量	水质现状	万元产值 工业耗水量
理想解	0.1708	0.0952	0.0952	0.2821	0.0277	0.0884
负理想解	0.3075	0.1210	0.2442	1.0617	0.0326	0.0264
指 标	万元产值 农业耗水量	农业灌溉单位 面积用地表水量	万元产值 废水排放量	单位面积 废水排放量	水资源重复 利用率	废水达标 排放率
理想解	0.0406	0.0377	0.0500	0.0405	0.0171	0.0171
负理想解	0.0219	0.0219	0.0270	0.0270	0.0157	0.0328
指 标	工业废水 治理率	工业废水 治理达标率	城市污水 处理率	城市污水 达标率	人均国内 生产总值	国内生产总值
理想解	0.0171	0.0171	0.0171	0.0171	0.0366	0.0366
负理想解	0.0167	0.0225	0.0462	0.0492	0.0392	0.1372

计算 S_i^+ 、 S_i^- 和 C_i^+ , 结果见表 4。

表 4 各区域的 S_i^+ 、 S_i^- 和 C_i^+ 计算结果

Tab. 4 Results of S_i^+ 、 S_i^- and C_i^+ in every region

区域	S^+	S^-	$C^+ (\times 100)$	区域	S^+	S^-	$C^+ (\times 100)$
龙羊峡以上	1.0489	0.2870	78.5189	伊洛河流域	1.1207	0.3411	76.6650
龙兰区间	1.1289	0.3505	76.3065	三花区间	1.1320	0.3532	76.2182
湟水流域	1.1169	0.3392	76.7025	沁河流域	1.1333	0.3554	76.1251
洮河流域	1.1150	0.3380	76.7389	黄河下游	1.1248	0.3457	76.4916
兰河区间	1.1383	0.3629	75.8237	黄河流域	0.9036	0.2252	80.0511
泾河流域	1.1328	0.3573	76.0211	级	1.0689	0.2883	78.7557
北洛河流域	1.1372	0.3600	75.9573	级	1.1158	0.3438	76.4447
渭河流域	1.1072	0.3325	76.9059	级	1.1267	0.3472	76.4435
河龙区间	1.1202	0.3483	76.2821	级	1.1419	0.3659	75.7341
汾河流域	1.1310	0.3547	76.1269	级	1.1509	0.3751	75.4210
龙三区间	1.1337	0.3561	76.0961				

对 $C^+ (\times 100)$ 的大小排序得

黄河流域	级	龙羊峡以上	渭河流域	洮河流域	湟水流域	伊洛河流域
>	>	>	>	>	>	>
80.0511	78.7557	78.5189	76.9059	76.7389	76.7025	76.6650
黄河下游	级	级	龙兰区间	河龙区间	三花区间	汾河流域
>	>	>	>	>	>	>
76.4916	76.4447	76.4435	76.3065	> 76.2821	76.2182	76.1269
沁河流域	龙三区间	泾河流域	北洛河流域	兰河区间	级	级
>	>	>	>	>	>	>
76.1251	76.0961	76.0211	75.9573	75.8237	75.7341	75.4210

显然,黄河流域可再生性高于 Ⅱ级标准(下限值,下同),龙羊峡以上、渭河流域、洮河流域、湟水流域、伊洛河流域和黄河下游依次介于 Ⅱ级和 Ⅲ级标准之间,其余介于 Ⅲ级和 Ⅳ级之间。如果采用隶属度划分等级,各区域可再生性等级评价结果见表 5。

表 5 黄河流域各区域地表水资源可再生性综合评价结果

Tab. 5 Assessment results of renewability of surface water resources in the Yellow River basin

区 域	龙羊峡以上	龙兰区间	湟水流域	洮河流域	兰河区间	泾河流域	北洛河流域	渭河流域
评价等级	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ
区 域	河龙区间	汾河流域	龙三区间	伊洛河流域	三花区间	沁河流域	黄河下游	黄河流域
评价等级	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ

可见黄河流域和龙羊峡以上属于 Ⅱ级,湟水流域、洮河流域、伊洛河流域、渭河流域和黄河下游区域属于 Ⅲ级,兰河区间、泾河流域和北洛河流域属于 Ⅲ级,其余区域属于 Ⅳ级。

3.3 结果对比分析

表 6 两种评价方法的结果对比

Tab. 6 Comparison between the two assessment methods

区 域	模糊综合评价	TOPSIS法	区 域	模糊综合评价	TOPSIS法
龙羊峡以上	Ⅱ	Ⅱ	河龙区间	Ⅲ	Ⅲ
龙兰区间	Ⅲ	Ⅲ	汾河流域	Ⅲ	Ⅲ
湟水流域	Ⅲ	Ⅲ	龙三区间	Ⅲ	Ⅲ
洮河流域	Ⅲ	Ⅲ	伊洛河流域	Ⅲ	Ⅲ
兰河区间	Ⅲ	Ⅲ	三花区间	Ⅲ	Ⅲ
泾河流域	Ⅲ	Ⅲ	沁河流域	Ⅲ	Ⅲ
北洛河流域	Ⅳ	Ⅳ	黄河下游	Ⅳ	Ⅳ
渭河流域	Ⅳ	Ⅳ	黄河流域	Ⅳ	Ⅳ

北洛河流域是最弱的区域。

4 结 论

水资源是一种可再生资源,其再生性分为自然可再生性和社会可再生性。本文基于地表水资源可再生性基本涵义建立黄河流域地表水资源可再生性评价指标体系,并引入决策方法 TOPSIS 技术进行评价,主要结论如下:

(1) 从性质上,地表水资源可再生分为水质恢复和水量再生。自然水量再生是地表再生水资源的主体。从属性上,地表水资源可再生的分为自然再生和社会再生,前者通过自然循环得到,后者通过社会循环得到。这四种再生类型相互交叉相互联系,构成一个耦合系统。

(2) 建立的黄河流域地表水资源可再生性评价指标体系既能反映再生能力又能反映区域的总体再生水平,可以全面的反映各分区的地表水资源可再生性。

(3) 利用 TOPSIS 法进行评价,发现主要产水区域如龙羊峡以上、湟水流域、洮河流域和渭河流域等都是水资源可再生性相对最强或较强的区域,北洛河流域是最弱的区域,其余属于中等或者较弱区域。

由于水资源可再生性评价是一个新兴的研究领域,其评价理论和方法有待进一步完善,本文对此进行初步探索,还有大量的研究工作需要展开。

参考文献

- [1] 刘昌明,成立. 黄河干流下游断流的径流序列分析[J]. 地理学报. 2000, 55(3): 257 - 265.
- [2] 朱小原,张学成. 黄河水资源变化研究[M]. 郑州:黄河水利出版社. 1999:92 - 96;122 - 132.
- [3] 左其亭,吴泽宁. 基于风险的黄河流域水资源可再生性评价指标[J]. 人民黄河. 2003, 25(1): 38 - 40.
- [4] 左其亭,王中根. 现代水文学[M]. 郑州:黄河水利出版社. 2002
- [5] 夏军,王中根,刘昌明. 黄河水资源可再生性问题及量化研究[J]. 地理学报. 2003, 58(4): 534 - 541.
- [6] 沈珍瑶,杨志峰. 黄河流域水资源可再生性评价指标体系与评价方法[J]. 自然资源学报. 2002, 17(2): 188 - 197.
- [7] 石春先,吴泽宁,丁大发,等. 黄河流域水资源多维临界调控方案评价研究[J]. 人民黄河. 2003, 25(1): 36 - 38.
- [8] 沈珍瑶,杨志峰,刘昌明. 水资源的天然可再生能力及其与更新速率之间的关系[J]. 地理科学. 2002, 22(2): 162 - 165.
- [9] Sandra L. Postel. Human appropriation of renewable fresh water[J]. Science. 1996, 271(9): 785 - 788.
- [10] 杨志峰,沈珍瑶,夏星辉,等. 水资源可再生性基本理论及其在黄河流域的应用[J]. 中国基础科学. 2002, (5): 4 - 7.
- [11] 沈珍瑶,杨志峰. 水资源的可再生性与可持续利用[J]. 中国人口资源与环境. 2002, 12(5): 77 - 78.
- [12] 李春晖. 黄河流域地表水资源可再生性评价[博士学位论文][D]. 北京师范大学, 2003, 7: 9 - 11; 114.
- [13] 杨剑波. 多目标决策方法与应用[M]. 长沙:湖南出版社, 1996. 110 - 114.
- [14] 胡永宏. 对 TOPSIS 法用于综合评价的改进[J]. 数学的实践与认识. 2002, 32(4): 572 - 574

[15] 李春晖,李爱贞. TOPSIS 法在环境质量综合评价中的应用[J]. 地质灾害与环境保护. 1999, (2): 9 - 13.

Assessment of the Renewability of Surface Water Resources in the Yellow River Basin

LI Chun - hui YANG Zhi - feng

(School of Environment , Beijing Normal University , Beijing 100875 ,China)

Abstract

Water resources has natural renewal and social renewal , water quantity renewal and water quality recovery. The assessment indices system of surface water resources renewability in the Yellow River basin had been set up by the meaning of water resources renewability , and then the TOPSIS method was applied to assess the renewability of surface water . The results showed that the main regions of water resources , for example Upward of Longyangxia , Huangshui basin , Taohe basin and Weihe basin and so on , were the strongest or stronger water resources renewability , and Beiluohe basin was the lowest water resources renewability and the others were middle or lower water resources renewability.

Key words : water resources renewability ; TOPSIS ; assessment ; the Yellow River Basin

www.cnki.net